

UNIVERSITÉ DES ANTILLES ET DE LA GUYANE

Dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches

Etude de systèmes de culture alternatifs aux monocultures intensives conventionnelles. Restauration des fonctions éco-systémiques du sol

Marc DOREL

SOMMAIRE

Chapitre 1. Curriculum Vitae.....	3
1.1 Etat civil et parcours professionnel.....	3
1.2 Activités d'encadrement	4
1.3. Activités d'enseignement.....	6
1.4 Expertises	6
1.5 Publications.....	7
Chapitre 2. Synthèse de l'activité scientifique.....	11
2.1 Parcours scientifique.....	11
2.2 Problématique et contexte.....	11
2.3 Enquêtes-Diagnostic: Fertilité des sols et contraintes agronomiques.....	13
2.4 Propriétés physiques du sol et enracinement du bananier	15
2.5 Etat physique du profil cultural, distribution des racines et alimentation en eau du bananier	18
2.6 Impact environnemental des systèmes de culture bananiers.....	19
2.7 Effet des pratiques culturales sur le statut organique et l'activité biologique des sols de bananeraie.....	19
2.8 Biodisponibilité des éléments minéraux et fonctionnement de la culture	21
2.9 Approche agro-écologique des systèmes de culture	22
Chapitre 3. Projet scientifique - Perspectives.....	25
3.1 Contexte - Problématique – Question scientifique	25
3.2 Démarche scientifique	26
3. 3 Structuration des activités - Projets de recherche	31
Chapitre 4. Références bibliographiques.....	38
Chapitre 5. Sélection de publications	44

Chapitre 1. Curriculum Vitae

1.1 Etat civil et parcours professionnel

Marc Dorel né le 18/08/1958 à Lyon
Marié, 2 enfants.

Adresse professionnelle:

CIRAD – UPR 26, Station CIRAD de Neufchateau, 97130 Capesterre Belle-Eau
Tél: 0590 86 17 59
E-mail : dorel@cirad.fr

Langues :

Anglais: lu, écrit, parlé - Espagnol: notions

Diplômes:

1976 : Bac C

1982 : Ingénieur Agronome de l'ENSAIA Nancy

2001 : Doctorat en sciences agronomiques et ingénierie biologique de l'Université Catholique de Louvain obtenu avec mention « Plus grande distinction ». Directeur de thèse B. Delvaux.

Parcours professionnel:

1983-1984 : Caisse Centrale de Coopération Economique Nouvelle Calédonie.
Volontaire Aide Technique.

1985 : Société PROCIDA (produits phytosanitaires). Assistant technique secteur Sarthe-Maine et Loire.

1986 – 1997: Chercheur en agronomie au CIRAD en Guadeloupe - Programme Bananier et plantains

1997-1998 : Chercheur en agronomie au CIRAD en Martinique - Programme Bananiers et Plantains

1998- 2000 : Chercheur en agronomie au CIRAD à Montpellier - UMR System

2000-2005 : Responsable exécutif du Département CIRAD-FLHOR en Guadeloupe - Chercheur en agronomie - UMR System

2005 - 2010 : Chercheur en agronomie au CIRAD en Guadeloupe - UPR 26 (Systèmes de culture bananiers, plantains et ananas)

1.2 Activités d'encadrement

. Encadrement de stages pour l'obtention du diplôme d'ingénieur

- V. Lefèbvre (1991). Profil cultural et racinaire en bananeraie. Mémoire ingénieur Agronome UCL
- C. Kechavarzi (1994). Caractérisation de l'état structural et du fonctionnement hydrique de profils culturaux en bananeraie. Mémoire ingénieur ISTOM
- N. Sondag (1996). Contribution à l'étude d'indicateurs de stress hydrique pour l'évaluation de l'alimentation en eau des bananiers. Mémoire ingénieur agronome UCL
- K. Lombard (2003). Statut organique et fertilité des sols dans les systèmes de culture bananiers en Guadeloupe. Mémoire ingénieur ENSA Montpellier
- C. Dallemagne (2003). Etude de la qualité des sols de la bananeraie guadeloupéenne et de leur sensibilité au nématode phytoparasite du bananier *Radopholus Similis*. Mémoire Bio-Ingénieur UCL.
- O. Tilleult et R. Van der Perre (2004). Sols et pérennité des bananeraies en Basse-Terre (Guadeloupe). Mémoire Bio-Ingénieur UCL
- L. Bodarwé (2006). Etude in situ de la biodisponibilité en Silicium pour le bananier au sein d'une séquence d'altération de sols volcaniques en Guadeloupe. Mémoire bio-Ingénieur UCL
- N. de Jaeger (2006). Etude en conditions contrôlées de la biodisponibilité en Silicium pour le bananier au sein d'une séquence d'altération (Guadeloupe). Mémoire bio-Ingénieur UCL.
- M.L. Vermeire (2009). Effet d'un traitement en silicium sur la tolérance du bananier à la maladie racinaire causée par *Cylindrocladium spathiphylli*. Mémoire bio-Ingénieur UCL

. Encadrement de stages de Master 2

- C. Pététin (2007). Effets de différentes modalités de travail du sol et du semis direct sur la qualité du sol de bananeraie en Guadeloupe. UAG. Mémoire Master 2
- F. Viaud. (2008). Le soja pérenne (*Neonotonia Wightii*), plante de couverture en bananeraie: étude de la fixation d'azote et des effets allélopathiques. UAG. Mémoire Master 2.

- T. Chevrollier (2009). La faune du sol dans l'agriculture : cas de la bananeraie sous différentes pratiques culturales. UAG. Mémoire Master 2.

. Encadrement de thèses

- B. Khamsouk (1998-2001) – ENSA Montpellier - Influence des systèmes de culture bananiers sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes de nutriments sur un sol volcanique en Martinique.
Après définition des grandes lignes du sujet, j'ai contacté Eric Roose directeur de recherche à l'IRD afin qu'il assure la direction de la thèse.
J'ai participé au jury de cette thèse et été co-auteur **d'1 publication** dans le cadre de la thèse
- Ph.Tixier (2001-2004) – ENSA Montpellier - Conception assistée par modèle de systèmes de culture durables : Application aux systèmes de culture bananiers de Guadeloupe (2002-2004).
J'ai assuré le montage financier de la thèse et participé à l'encadrement en Guadeloupe du doctorant en appui au directeur de thèse (Jacques Wery) et à l'encadrant principal (Eric Malézieux) basés tous deux à Montpellier (UMR System).
J'ai été co-auteur de **3 publications** dans le cadre de la thèse
- C.Henriet (2004-2007) – Université Catholique de Louvain - Biodisponibilité du silicium dans les sols et son absorption par le bananier. Cette thèse dirigée par Bruno Delvaux a reposé sur des expérimentations réalisées en Belgique à l'UCL, au Cameroun au CRBP et au CIRAD en Guadeloupe. J'ai assuré l'encadrement de la doctorante lors de son séjour en Guadeloupe. J'ai été membre du jury de thèse et co-auteur de **2 publications** dans le cadre de la thèse.
- P. Tabarant (2008-2010) – Ecole doctorale ABIES - Effets d'apports de matière organique sur la santé des sols et la régulation du parasitisme tellurique en bananeraie (2008-2011). J'ai effectué le montage de cette thèse CIFRE en partenariat avec l'entreprise guadeloupéenne Verde-Sofunag. J'en assure la co-direction avec Jean Roger-Estrade d'AgroParisTech.
- J.C. Govindin (2009-2012) – Ecole Doctorale UAG – Analyse des impacts de l'introduction d'une plante de service et d'un travail minimum du sol, sur la mise en place et l'état sanitaire des racines : Contribution à la mise au point de systèmes de culture ananas sans pesticide. Je suis l'encadrant principal de cette thèse dont le directeur est Amadou Bâ, professeur à l'UAG.

1.3. Activités d'enseignement

- . ESA Angers (élèves ingénieurs 2^{ème} année) : Les systèmes de cultures fruitiers tropicaux (1999 – 8 h de cours)
- . LEGTA Guadeloupe (Enseignants et formateurs) : Durabilité des systèmes de culture (2007 - 4 h de cours)
- . Université Antilles-Guyane (Licence, Master 1 et 2): Fonctionnement des agro-systèmes bananiers (depuis 2006: 6 heures de cours et 4 heures de TP par an).

1.4 Expertises

- 1990 : Haïti. Amélioration des systèmes de culture bananiers sur le périmètre irrigué de l'Arcahaie. (AFD)
- 1991 : Sainte Lucie. Problèmes de variations somaclonales sur les plants de bananier issus de culture in vitro commercialisés par la société Vitropic.
- 1992 : Tanzanie. Etude des contraintes agronomiques pour la culture bananière dans le district de Bukoba. Mise au point d'une méthode d'enquête-diagnostic.
- 1993 : Dominique. Mise au point d'une méthode d'enquête-diagnostic pour évaluer les contraintes agronomiques dans les bananeraies de la Dominique.
- 1996 : Ste Lucie : Elaboration d'un projet pour la modernisation de l'industrie bananière dans les Winward Islands.
- 1999 Cameroun : Evaluation du système d'irrigation des plantations de banane du groupe PNP-PHP-SBM. Bilan hydrique de la culture. Proposition d'amélioration de la gestion de l'eau.
- 2001 et 2003 : Haïti. Diagnostic fertilité des sols et fertilisation des bananeraies du périmètre irrigué de l'Arcahaie (AFD)
- 2004 : République Dominicaine : Adaptation des techniques de production de banane aux normes européennes Eurepgap (UE)
- 2008 : Haïti: Etude des sols préalable à l'implantation d'un verger d'oranges amères (Société Marnier).
- 2008 : Côte d'Ivoire. Expertise agropédologique des plantations de bananes de Côte d'Ivoire (UE)

1.5 Publications

. Revues à comité de lecture et facteur d'impact

1. **Dorel M.**, Lakhia S., Pététin C., Bouamer S., Risède J.M., 2010. No till banana planting on crop residue mulch. Effect on soil quality and crop functioning. *Fruits*, sous presse, **IF : indexage ISI en cours**
2. Rhino B. **Dorel M.**, Tixier P. Risède J.M. 2010. Effect of fallows on population dynamics of *Cosmopolites sordidus*: toward integrated management of banana fields with pheromone mass trapping *Agricultural and Forest Entomology*, DOI: 10.1111/j.1461-9563.2009.00468. **IF=1,377**
3. Henriët C., Bodarwé L., **Dorel M.**, Draye X., Delvaux B., 2008. Leaf silicon content of banana reveals the weathering stage of volcanic ash soil in Guadeloupe. *Plant and Soil*. DOI 10.1007/s11104-008-9680-7, **IF=1,821**
4. Henriët C., De Jaeger N., **Dorel M.**, Opfergelt S., Delvaux B. 2008. The reserve of weatherable primary silicates impacts the accumulation of biogenic silicon in volcanic ash soils. *Biogeochemistry* DOI 10.1007/s10533-008-9245-0, **IF=2,534**
5. **Dorel M.**, Achard R., Tixier P. 2008. SIMBA-N: Modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean. *European journal of agronomy*, 29, 1, 38-45. **IF=1,503**
6. Tixier P., Malézieux E., **Dorel M.**, Wery J. 2008. SIMBA, a model for designing sustainable banana-based cropping systems. *Agricultural systems*, 97 (3) : 139-150, **IF=1.677**
7. Lafont A., Risède J.M., Loranger-Merciris G., Clermont Dauphin C., **Dorel M.**, Rhino B., Lavelle P. 2007. Effects of the earthworm *Pontoscolex corethrurus* on banana plants infected or not with the plant-parasitic nematode *Radopholus similis*. *Pedobiologia*, 51 (4), 311-318, **IF=1,383**
8. Tixier P., Malezieux E., Girardin P., Bockstaller C., **Dorel M.** 2007. Rpest—An indicator linked to a crop model to assess the dynamics of the risk of pesticide water pollution. Application to banana-based cropping systems. *European Journal of Agronomy*, 26, 71-81, **IF=1,503.**
9. P. Tixier, J.-M. Risède, **M. Dorel**, E. Malézieux 2006. Modeling population dynamics of banana plant-parasitic nematodes: A contribution to the design of sustainable cropping systems. *Ecological modelling*, 198, 321–331, **IF=2,077**
10. Tixier Ph, Malézieux E., **Dorel M.** 2004. SIMBA-POP : a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecological modelling*, 180, 407-417, **IF=2,077**

11. **Dorel M.** Roger-Estrade J., Manichon H. Delvaux B. 2000. Porosity and Soil-Water Properties of Caribbean volcanic ash soil. *Soil Use and Management*. 16, 133-140, **IF=0.795**

12. Chillet, M., De Lapeyre de Bellaire, L., **Dorel, M.**, Joas, J., Dubois, C., Marchal, J., Perrier, X. 2000. Evidence for the variation in susceptibility of bananas to wound anthracnose due to *Colletotrichum musae* and the influence of edaphic conditions. *Scientia Horticulturae*, 86, 33-47, **IF=0,694**

13. Perret S. **Dorel M.** 1999. Relationships between land use, fertility and the andisols behaviour: examples from volcanic islands. *Soil Use and Management*, 15, 144-149, **IF=0.795**

14. **Dorel M.** Ozier-Lafontaine H. 1998. Pilotage de l'irrigation des bananeraies sur sols ferrallitiques et sols vertiques en Guadeloupe : recherche d'indicateurs de l'état hydrique. *Fruits*, 53, 1, 17-26. **IF : indexage ISI en cours**

15. **Dorel M.** 1993. Développement du bananier dans un andosol de Guadeloupe : effet de la compacité du sol. *Fruits*, 48,2, 83-88, **IF : indexage ISI en cours**

16. **Dorel M.** 1993. Travail du sol en bananeraie. Cas des Andosols. *Fruits*, 48, 2, 77-82, **IF : indexage ISI en cours**

17. **Dorel M.** 1991. Problèmes de préparation des sols en bananeraie. Cas des sols à halloysite. *Fruits*, 46, 4, 419-427, **IF : indexage ISI en cours**

18. Delvaux B., Vielvoye L., **Dorel M.** 1991. Comportement d'échange du potassium dans les sols de la bananeraie guadeloupéenne. Application à la programmation de la fumure potassique. *Fruits*, 46, 1, 3-11, **IF : indexage ISI en cours**

19. Delvaux B., **Dorel M** 1990. Enquêtes diagnostics réalisées en bananeraies intensives du Cameroun, de la Martinique et de la Guadeloupe. *Fruits*, n° spéc., 89-93, **IF : indexage ISI en cours**

20. **Dorel M.** Perrier X., 1990. Influence du milieu et des techniques culturales sur la productivité des bananeraies de Guadeloupe. Enquête-Diagnostic. *Fruits*, 45, 3, 237-244, **IF : indexage ISI en cours**

. Revues à comité de lecture sans facteurs d'impact

1. Khamsouk B., Roose E., **Dorel M.**, Blanchart E., 1999. Effets des systèmes de culture bananière sur la stabilité structurale et l'érosion d'un sol brun-rouille à halloysite en Martinique. *Bulletin réseau érosion*, 19, 206-215.

2. **Dorel M.**, Lombard K., Oliver R. 2005. Azote minéralisable et statut organique des Andosols de Guadeloupe. Influence du milieu et des pratiques culturales. *Etude et Gestion des Sols*, 12, 4, 267-280

. Revues sans comité de lecture

1. **Dorel M.**, 2000. Contrats Territoriaux d'Exploitation (CTE) pour les exploitations bananières de Guadeloupe : proposition pour une mesure "Bananeraie pérenne d'altitude". *Fruitrop*, 74, 6-8.

. Congrès, colloques - Communications et posters

1. **Tabarant P.**, Dorel M., Risède J.m., Villenave C., Villemin P., Roger-Estrade J. 2010. Organic amendments control banana plant-parasitic nematodes: effects of organic matter quality on nematodes communities. *Proceedings of Agro 2010, the XIth ESA Congress, Montpellier*, 215-216
2. **Damour G.**, Dorel M., 2010. Functional traits of roots system: a tool to select cover-crops. The case of the banana-Neonotonia cropping system. *Proceedings of Agro 2010, the XIth ESA Congress, Montpellier*, 469-470
3. **Risède J.M.**, Chabrier C., Dorel M., Rhino B., Lakhia K., Jenny C., Quénéhervé P. 2009. Recent and Up-Coming strategies to counter plant-parasitic nematodes in banana cropping systems of the French West Indies. *Acta Horticulturae* 828:117-128. In D. Jones, I. Van den Bergh (eds.) *Proceedings of the International Symposium on Recent advances in Banana Crop Protection for Sustainable and Improved Livelihoods, 2007/09/10-14, White River, South Africa*.
4. **Dorel M.**, Tixier Ph., Achard R., 2006. Management of banana nitrogen fertilization : taking into account nitrogen from organic origin. *Proceedings XVII Acorbat Meeting, Joinville, Santa Catarina, Brésil*
5. **Bonin, M.**, Cattan, P., Dorel, M., Malézieux, E., 2006. L'émergence d'innovations techniques face aux risques environnementaux. Le cas de la culture bananière en Guadeloupe : entre solutions explorées par la recherche et évolution des pratiques. In : *Agronomes et Innovations, 3e édition des entretiens du Pradel. Actes du colloque des 8-10 septembre 2004. J. Caneill (ed.). L'Harmattan, Paris*, 123-135
6. **Dorel M., Roger-Estrade J.** 1998. Porosité et propriétés hydriques des sols volcaniques de la Guadeloupe : rôle des constituants du sol. *Proceedings 16^{ème} Congrès mondial de sciences du sol. Montpellier, France*.
7. Brisson N., **Dorel M.**, Ozier-Lafontaine H. 1997. Effects of soil management and water regime on banana growth between planting and flowering. *Simulation*

using STICS model. Proceedings of the First International Symposium on Banana in the Subtropics, Tenerife, Espagne. *Acta Horticulturae*, 490, 229-238.

8. **Dorel, M.**, Ozier Lafontaine, H. 1996. Amélioration du pilotage de l'irrigation dans les bananeraies de Guadeloupe. *Proceedings XII Acorbat Meeting*, Santo Domingo, République Dominicaine.

9. **Dorel M.** 1994. Mécanisation et tassement des sols en culture bananière. *Proceedings XI Acorbat Meeting*, San Jose, Costa Rica,

10. **Dorel M.**, **Risède J.M.**, **Simon S.** 1991. Enracinement du bananier dans les andosols de Guadeloupe. Influence du système de culture. – Proceedings X Acorbat Meeting, Villahermosa, Tabasco, Mexique.

Chapitre 2. Synthèse de l'activité scientifique

2.1 Parcours scientifique

Après avoir participé à plusieurs enquêtes-diagnostic visant à identifier les facteurs responsables de la dégradation de la fertilité des sols dans les bananeraies des Antilles, mes activités de recherche ont été axées entre 1990 et 2000 sur l'étude de l'état physique du sol, de ses déterminants et de ses effets sur le fonctionnement de la culture bananière. Ces travaux ont débouché en 2001 sur la soutenance de ma thèse. Au cours de cette période je me suis également intéressé à l'impact de la culture bananière sur l'environnement en mesurant l'effet des pratiques culturales sur le ruissellement et l'érosion et en étudiant les transferts de pesticides dans les eaux à l'échelle d'un petit bassin versant.

A partir de 2000, j'ai orienté mes activités vers d'autres aspects du fonctionnement des sols: le statut organique et l'activité biologique, les mécanismes de régulation du parasitisme tellurique, la biodisponibilité des éléments nutritifs. L'objectif de ces travaux est de fournir les bases scientifiques pour la conception de systèmes de culture innovants à faibles niveaux d'intrants chimiques. Les systèmes étudiés sont basés sur la restauration des fonctions agro-écologiques des sols à travers l'amélioration du bilan organique et l'augmentation de diversité de la couverture végétale dans le temps (rotation culturales) et dans l'espace (association de culture, plante de couverture).

2.2 Problématique et contexte

Mes activités de recherche s'inscrivent dans une problématique générale de baisse de fertilité des sols et d'impacts négatifs sur l'environnement liés à la pratique de la culture de la banane en milieu insulaire sous climat tropicale humide.

Les systèmes de culture bananiers que j'ai étudiés aux Antilles sont fortement contrastés. On observe en Guadeloupe des bananeraies pérennes non mécanisées à faibles niveaux d'intrants chimiques dans les zones d'altitude du sud de la Basse-Terre. Dans les plaines mécanisables, la culture de la banane est conduite de manière plus intensive avec une replantation périodique des parcelles impliquant une mécanisation lourde et une utilisation importante d'intrants chimiques (engrais, pesticides). L'impact environnemental des systèmes de cultures bananiers intensifs a été mis sur le devant de la scène médiatique au cours des dernières années avec le constat de la contamination des sols et des eaux par une matière active de la famille des organo-chlorés, la chlordécone, utilisée pour la lutte contre le charançon du bananier. Les traitements nématicides ainsi que les applications d'herbicides en bananeraie font également l'objet de critiques en raison principalement des risques pour la santé des ouvriers appliquant ces produits. D'une manière plus générale, l'érosion hydrique des sols cultivés de manière intensive contribue à augmenter la turbidité des eaux du littoral et à accélérer la dégradation des récifs coralliens.

Le contexte pédo-climatiques antillais présente des spécificités importantes. On observe une forte variabilité du climat sur de très courtes distances et notamment de la pluviométrie. Celle-ci peut atteindre des niveaux très élevés entraînant une altération

rapide des sols et un lessivage intense des composés solubles (cations basiques, silice).

Les sols tropicaux d'origine volcanique possèdent des propriétés physico-chimiques très particulières notamment en ce qui concerne les sols d'altitude:

- la fraction minérale est dominée par des minéraux amorphes peu organisés à forte affinité pour la matière organique (sol andiques). Le comportement du sol s'apparente à celui d'un gel avec une forte sensibilité aux contraintes hydriques et des propriétés mécaniques spécifiques telles que la thixotropie (passage direct de l'état solide à l'état liquide sous l'effet d'une contrainte mécanique).

- les sols possèdent une charge électrique variable avec le pH et peuvent présenter une capacité d'échange anionique importante.

Dans un tel contexte, l'évaluation de l'effet des pratiques culturales sur l'état du sol doit être effectuée en intégrant les spécificités du milieu et suppose l'établissement et l'utilisation d'un référentiel adapté.

2.3 Enquêtes-Diagnostic: Fertilité des sols et contraintes agronomiques

Mon activité scientifique a débuté au sein du CIRAD en 1986 par une évaluation, par voie d'enquête-diagnostic, des facteurs édaphiques limitant la productivité des bananeraies en Guadeloupe. Ces travaux furent effectués avec l'appui de Bruno Delvaux alors chercheur au CIRAD qui conduisait une étude du même type sur les bananeraies de Martinique. Ces enquêtes-diagnostic ont consisté en plusieurs campagnes d'échantillonnage sol-plante sur plus de 120 parcelles dans chacune des deux îles et se sont étalées sur une période de deux ans. Le traitement des données par analyses statistiques multi-variées a permis de hiérarchiser les facteurs limitant les rendements en culture bananière et d'identifier des contraintes majeures liées au parasitisme tellurique et à la dégradation de la structure des sols dans les systèmes monoculturels intensifs mécanisés. Ces travaux ont cependant montré une grande variabilité de l'état sanitaire de l'appareil souterrain du bananier en fonction des conditions pédo-climatiques (figure 1). Des systèmes racinaires d'excellente qualité sanitaire furent notamment observés dans les sols volcaniques récents de moyenne altitude du sud de la côte sous le vent de la Basse-Terre où les bananeraies étaient conduites comme une culture pérenne.

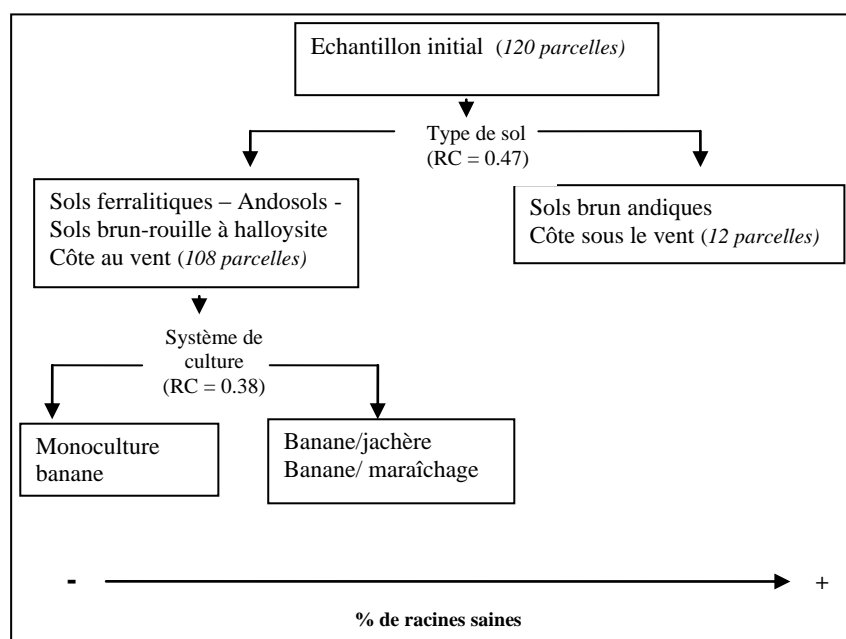


Figure 1 : Analyse par segmentation des facteurs expliquant la variabilité de l'état sanitaire des racines dans les bananeraies de Guadeloupe

Ces résultats m'ont amené à formuler deux hypothèses:

Hypothèse 1 : La nature des constituants du sol influent sur l'état nutritionnel du bananier, sa résistance aux stress biotiques et abiotiques et sur la longévité des bananeraies

Hypothèse 2 : L'intensification de la culture du bananier (mécanisation des interventions culturales, applications massives de pesticides) induit une perturbation de l'état biophysique du sol qui entraîne une dégradation de l'état sanitaire des racines.

Ces hypothèses ont sous-tendu par la suite une série d'opérations de recherche entreprises en collaboration avec Bruno Delvaux devenu professeur à l'Université Catholique de Louvain en Belgique.

Dorel M., Perrier X., 1990. Influence du milieu et des techniques culturales sur la productivité des bananeraies de Guadeloupe. Enquête-Diagnostic. Fruits vol 45 n°3, 237-244.

Delvaux B., Dorel M 1990. Enquêtes diagnostics réalisées en bananeraies intensives du Cameroun, de la Martinique et de la Guadeloupe. Fruits n° spéc., 89-93.

2.4 Propriétés physiques du sol et enracinement du bananier

L'observation de dégradations importantes de la structure des sols sous monoculture bananière conventionnelle m'a conduit à étudier l'effet des pratiques culturales (replantations, travail du sol, mécanisation des interventions en cours de culture) sur l'état physique et le fonctionnement hydrique du profil cultural sous culture bananière. J'ai pour ceci couplé une approche descriptive de la structure du sol et de la morphologie du profil cultural (Manichon, 1982) à une caractérisation fonctionnelle de la porosité basée (i) sur des mesures de teneurs en eau et de volume poral pour une gamme de potentiel hydrique allant de pF 1 à pF 4.2 (Tessier et Berrier, 1978) et (ii) sur des mesure d'infiltration sous succion contrôlée (Perroux et White, 1988). Ces travaux sur les propriétés physiques des sols (voir Chap. 5 publication n°4) m'ont conduit à collaborer avec Folkert Van Oort et Daniel Tessier (INRA-Versailles) ainsi qu'avec Jean Roger-Estrade (INA-PG).

Pour mieux comprendre les mécanismes de dégradation de la structure des sols, j'ai étudié l'effet des contraintes mécaniques et hydriques sur la porosité en pratiquant des tests de compactage statique à différents potentiels hydriques (Sala et Tessier, 1994) et des tests de compactage dynamique (test Proctor). J'ai également étudié la stabilité des agrégats en réalisant des tests simulant au laboratoire l'impact des gouttes de pluies ou les alternances humectation-dessiccation (Le Bissonnais, 1996).

Les résultats de ces travaux montrent que la structure des sols volcaniques sur lesquelles sont situées la majeure partie des bananeraies (sols andiques) est très sensible à l'effet des contraintes hydriques. Le dessèchement des sols entraînent notamment des modifications irréversibles de leur porosité. Les contraintes hydriques observées in situ sont globalement faibles en raison de la forte pluviosité. Celles-ci sont cependant amplifiées par la mise en culture et notamment par le travail du sol qui favorise le dessèchement de la couche labourée. Les contraintes mécaniques n'ont qu'un effet limité sur la porosité totale du sol. Elles altèrent en effet surtout la macroporosité qui ne représente qu'une faible part de la porosité totale des sols volcaniques de Guadeloupe. Bien que ces altérations ne concernent qu'une faible fraction du volume poral, elles réduisent fortement la circulation des fluides et induisent des conditions d'anoxie (figures 2). De telles contraintes sont faiblement documentées dans les sols andiques réputés pour leurs propriétés physiques favorables à la mise en culture (Shoji et al, 1993).

J'ai ensuite étudié les relations entre l'état physique du sol et l'enracinement du bananier.

J'ai tout d'abord observé de nombreux profils culturaux sur des toposéquences de sol représentatives de la variabilité de conditions pédo-climatiques en couvrant une large gamme de pratiques culturales. Les différents modes de conduite de la bananeraie affectent l'état physique du sol et la distribution spatiale des racines. La mécanisation des interventions en cours de culture entraîne la formation de structures compactes dans les interlignes qui réduisent fortement l'extension latérale du système racinaire. La préparation des sols effectuée à la replantation des bananeraies génèrent des discontinuités structurales qui limitent également la prospection du sol par les racines. Dans les sols non travaillés sous bananeraie pérenne, on observe une porosité structurale d'origine biologique abondante et une colonisation homogène de l'horizon humifère par les racines.

Je me suis intéressé ensuite aux effets du compactage du sol effectué en conditions contrôlées (rhizotron) sur l'enracinement du bananier. Ces travaux, qui ont notamment montré l'effet important de la compacité du sol sur la croissance et la morphologie des racines (figure 3), ont été poursuivis par la suite dans le cadre d'une thèse (Francois Lecompte, 2002).

Dorel M. 1993. Développement du bananier dans un andosol de Guadeloupe : effet de la compacité du sol. Fruits, 48,2, 83-88

Dorel M. Roger-Estrade J., Manichon H. Delvaux B. 2000. Porosity and Soil-Water Properties of Caribbean volcanic ash soil. Soil Use and Management. 16, 133-140.

Dorel M., 2001. Effet des pratiques culturales sur les propriétés physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement du bananier. Thèse UCL, 129 p

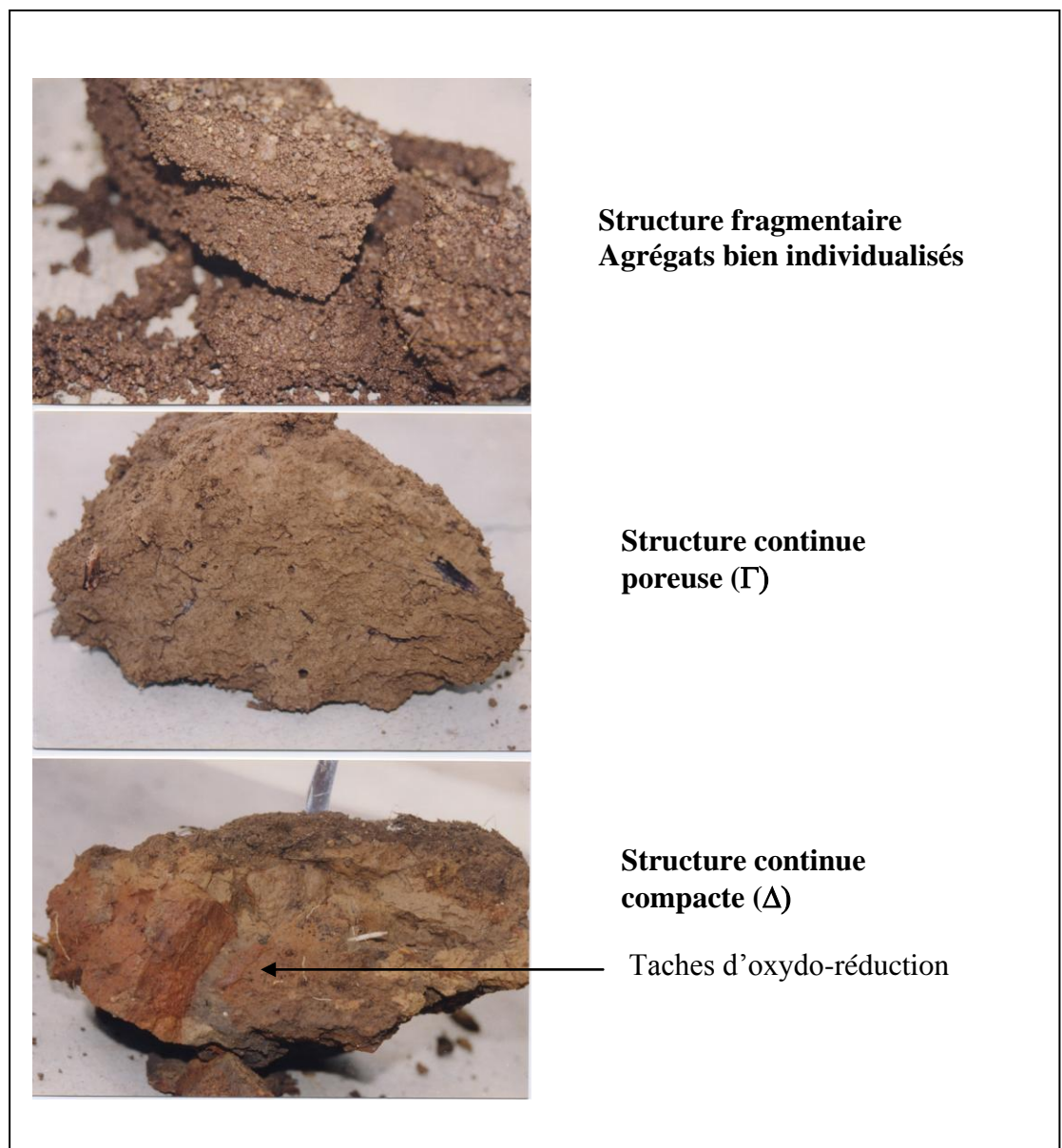


Figure 2: Différents états structuraux d'un andosol sous culture bananière mécanisée

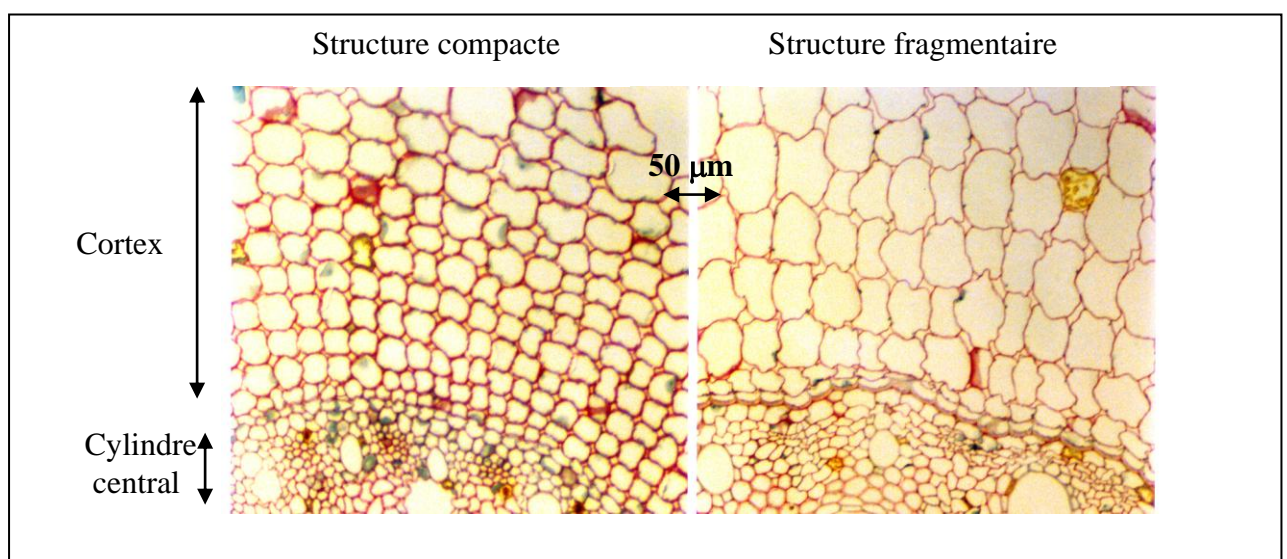


Figure 3 : Coupe histologique de jeunes racines de bananier issues d'un sol à structure compacte et d'un sol à structure fragmentaire

2.5 Etat physique du profil cultural, distribution des racines et alimentation en eau du bananier

Ayant montré que les variations de l'état physique du sol induisaient des modifications importantes de la distribution des racines, je me suis intéressé à l'effet de ces variations sur le fonctionnement du système racinaire et notamment le prélèvement de l'eau par les racines.

Pour ceci, il a fallu sélectionner des indicateurs fiables de l'état hydrique du bananier. J'ai donc été amené à tester en collaboration avec Harry Ozier Lafontaine de l'INRA-APC différents indicateurs : flux de sève (Granier, 1985), indice réfractométrique du latex (Milburn et al., 1990), vitesse de croissance journalière de la dernière feuille et repliement des demi-limbes (voir Chap. 5 publication n°5).

J'ai ensuite mis en place des expérimentations au champ reproduisant des états physiques du sol et des régimes hydriques contrastés. La quantité importante de données recueillies lors de ces expérimentations a permis de calibrer et valider le modèle de simulation de culture STICS (Brisson et al., 1998) en collaboration avec Nadine Brisson alors en poste à l'INRA-APC. L'utilisation du modèle a permis d'augmenter la portée des résultats expérimentaux en apportant une représentation globale et intégrée du fonctionnement de la culture (figure 4).

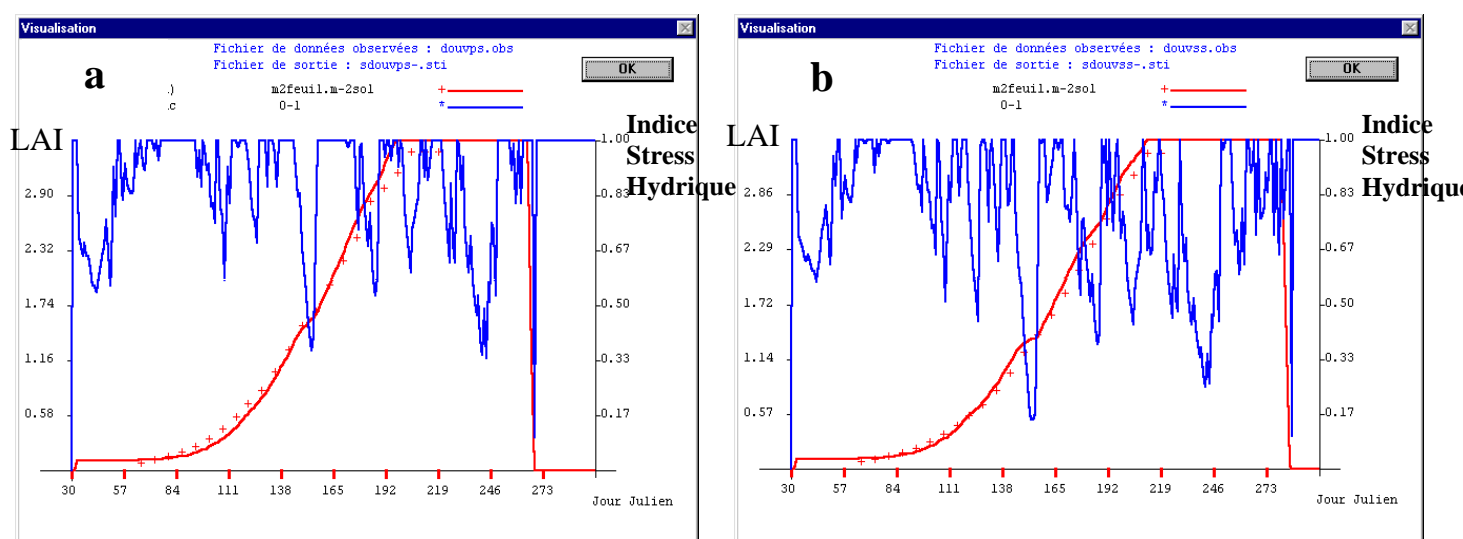


Figure 4: Evolution de l'indice foliaire (LAI) et de l'indice de stress hydrique sous culture sèche, a) Travail du sol profond, b) Travail du sol superficiel

LAI : valeurs observées (+), valeurs simulées STICS (—)

Indice de stress hydrique : valeurs simulées STICS (—)

Dorel M. Ozier-Lafontaine H. 1998. Pilotage de l'irrigation des bananeraies sur sols ferralitiques et sols vertiques en Guadeloupe : recherche d'indicateurs de l'état hydrique. *Fruits*, 53, 1, 17-26.

Brisson N., **Dorel M.**, Ozier-Lafontaine H. 1997. Effects of soil management and water regime on banana growth between planting and flowering. Simulation using STICS model. *Proceedings of the First International Symposium on Banana in the Subtropics*, Tenerife, Espagne. *Acta Horticulturae*, 490, 229-238.

2.6 Impact environnemental des systèmes de culture bananiers

. Ruissellement et érosion

J'ai évalué les phénomènes de ruissellement et d'érosion dans les sols de bananeraie sur des cases d'érosion sous pluie naturelles et à l'aide de mini-simulateur de pluie (Roose E. et Asseline J. 1978). Ces mesures ont permis de mettre en évidence les effets négatifs de la mécanisation des interventions en cours de culture (épandage d'engrais, désherbage mécanique, travail du sol superficiel) sur l'intensité du ruissellement et de l'érosion. Ces travaux ont été poursuivis dans le cadre d'une thèse, que j'ai initiée, dirigée par Eric Roose (B.Khamsouk).

Dorel M. 1993. Travail du sol en bananeraie. Cas des Andosols. *Fruits*, 48, 2, 77-82.

Dorel M. 1994. Mécanisation et tassement des sols en culture bananière. *Proceedings XI Acorbat Meeting*, San Jose, Costa Rica.

Khamsouk B. 2001. Influence des systèmes de culture bananiers sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes de nutriments sur un sol volcanique en Martinique. Thèse ENSA Montpellier, 214 p.

. Transfert de pesticides

Des quantités importantes de pesticides étant épandues dans les systèmes de monoculture bananière conventionnels, j'ai étudié dans le cadre d'un projet CORDET démarré en 1993 en partenariat avec l'ORSTOM, la contamination des eaux de ruissellement par les nématicides et insecticides qui constituaient les produits les plus toxiques utilisés en bananeraie. Cette étude a été conduite sur un petit bassin versant situé sur la station de Neufchâteau en Guadeloupe qui a été équipé d'un dispositif de collecte des eaux de ruissellement. Elle a mis en évidence montré des pics de contamination des eaux de ruissellement lors des épisodes pluvieux survenant après les épandages. Ces travaux ont été poursuivis après ma mutation en Martinique en 1997 dans le cadre du projet de recherche de Philippe Cattan.

Dorel M., Lafforgue A., Breteau P., Le Breton M., 1996. Etude de la contamination des eaux de ruissellement par les pesticides utilisés en bananeraie. *Projet Cordet 93 DA 14*, 31 p.

2.7 Effet des pratiques culturales sur le statut organique et l'activité biologique des sols de bananeraie

Le statut organique et l'activité biologique des sols ont été évalués en étudiant la distribution du carbone et de l'azote dans les différentes fractions granulométriques du sol, la taille de la biomasse microbienne et la quantité d'azote potentiellement minéralisable. Ces travaux, réalisés en collaboration avec le laboratoire MOST (IRD-

CIRAD, Montpellier), ont porté sur la comparaison de systèmes de culture bananiers conventionnels mécanisés, de systèmes de bananeraie pérenne non mécanisés à faible niveau d'intrants chimique et de rotations banane/ canne à sucre (voir Chap. 5 publication n°3). Ils ont consisté également à évaluer des techniques de plantation de bananiers innovantes inspirées du semis direct (Séguy et al, 2006). Les dispositifs expérimentaux mis en place ont permis l'accueil de deux stagiaires (K. Lombard ENSA Montpellier et C. Pététin UAG) au sein de notre équipe.

Dorel M. Lombard K., Oliver R. 2005. Azote minéralisable et statut organique des Andosols de Guadeloupe. Influence du milieu et des pratiques culturales. Etude et Gestion des Sols, vol 12, 4, 267-280

Dorel M., Lakhia S., Pététin C., Bouamer S., Risède J.M., 2010. No till banana planting on crop residue mulch. Effect on soil quality and crop functioning. Fruits vol.65, 2, 55-68.

2.8 Biodisponibilité des éléments minéraux et fonctionnement de la culture

. Biodisponibilité de l'azote sous culture bananière

Les sols de bananeraie présentant des stocks de matière organique très variables en fonction de l'historique cultural et des conditions pédo-climatiques, j'ai cherché à mettre au point un outil permettant de raisonner la fertilisation azotée en intégrant la fourniture d'azote par minéralisation de la matière organique.

Nous avons élaboré, en collaboration avec mon collègue Ph.Tixier, le modèle SIMBA-N permettant de simuler les dynamiques de l'azote sous culture bananière dans des conditions pédo-climatiques variables en intégrant les pertes d'azote minéral par lessivage, l'absorption par la plante et la minéralisation de l'azote organique. J'ai étudié la vitesse de minéralisation de l'N organique dans différents types de sol afin de calibrer le modèle. J'ai ensuite testé des indicateurs simples de l'état nutritionnel du bananier (teneur en chlorophylle, et teneur en azote de la feuille) que j'ai utilisé dans le cadre d'une expérimentation sur plusieurs cycles de culture comparant cinq eaux de fertilisation azotée. Les données collectées lors de cette expérimentation nous ont permis de valider le modèle SIMBA-N (voir Chap. 5 publication n°2).

Dorel M., Achard R., Tixier P. 2008. SIMBA-N: Modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean. *European journal of agronomy*, 29 (1), 38-45.

. Biodisponibilité du silicium et résistance du bananier aux bio-agresseurs

La nutrition en silicium n'est d'une manière générale pas prise en compte lorsque l'on effectue un diagnostic de l'état nutritionnel du bananier. Il est cependant absorbé en grande quantité par le bananier et est susceptible de jouer un rôle déterminant dans la résistance de la plante aux stress biotiques et abiotiques.

En collaboration avec Bruno Delvaux, nous avons poursuivons depuis 2004 un programme de recherche visant à évaluer (i) la biodisponibilité du silicium dans les sols de Guadeloupe et (ii) l'effet de la nutrition en Si sur la résistance de la plante aux bio-agresseurs. Les travaux, qui ont été conduit dans le cadre de la thèse de Céline Henriot et du stage de fin étude de plusieurs étudiants de l'UCL que j'ai encadrés, ont montré :

- (i) une grande variabilité de la biodisponibilité et de l'absorption du Si par le bananier dans les sols de Guadeloupe en relation avec degré d'altération des sols. Les sols de moyenne altitude de la côte sous le vent du sus de la Basse-Terre se révélant les plus riche en Si biodisponible (voir Chap. 5 publication n°1).
- (ii) l'influence positive de l'apport de cendres de bagasse ou de rotation culturale avec la canne à sucre sur la nutrition en Si du bananier.
- (iii) Un effet positif de l'apport de Si au bananier en conditions contrôlées sur sa tolérance du bananier à la maladie racinaire causée par *Cylindrocladium spathiphylli* (figure 5).

Ces résultats confortent l'hypothèse (H1) émise lors des enquêtes-diagnostic réalisées au début de ma carrière au CIRAD d'une relation entre la nature des constituants du sol et la résistance du bananier aux stress abiotiques expliquant la longévité des bananeraies de la Côte sous le vent du Sud Basse-Terre.

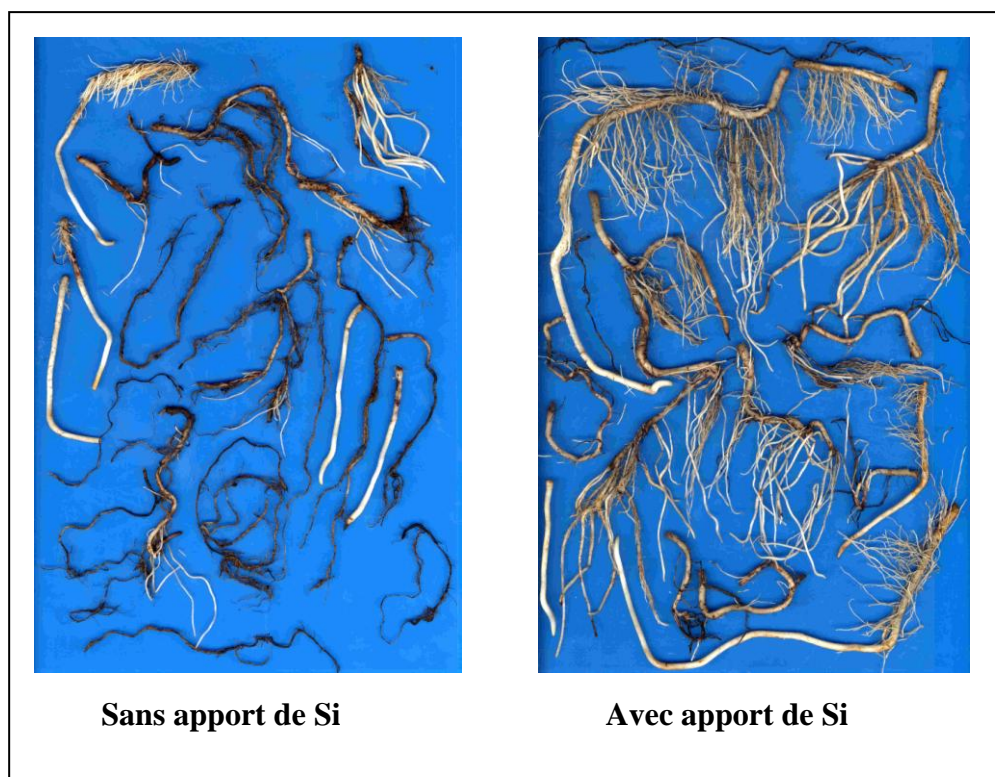


Figure 5 : Etat sanitaire de racines de bananiers inoculées avec *Cylindrocladium spathiphylli*

Henriet C., Bodarwé L., **Dorel M.**, Draye X., Delvaux B., 2008. Leaf silicon content of banana reveals the weathering stage of volcanic ash soil in Guadeloupe. *Plant and Soil*. DOI 10.1007/s11104-008-9680-7

Henriet C., De Jaeger N., **Dorel M.**, Opfergelt S., Delvaux B.. 2008. The reserve of weatherable primary silicates impacts the accumulation of biogenic silicon in volcanic ash soils. *Biogeochemistry* DOI 10.1007/s10533-008-9245-0

Henriet C. 2008. Silicon in banana: a soil-plant system approach. Thèse Université Catholique de Louvain. 249p.

2.9 Approche agro-écologique des systèmes de culture

Depuis 2007, j'étudie des systèmes de culture innovants permettant la restauration de fonctions de l'agro-système altérées dans les systèmes monoculturels intensifs. Ces systèmes innovants reposent (i) sur l'augmentation de la biodiversité des peuplements végétaux, dans l'espace (couverts végétaux multisécifiques) et dans le temps (rotations culturales,) et (ii) sur la stimulation des réseaux trophiques du sol par l'apport de matières organiques exogènes.

Les fonctions éco-systémiques que l'on cherche plus particulièrement à restaurer sont:

- la régulation biologique du parasitisme tellurique
- la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique
- l'interception des flux de solutés par les systèmes racinaires
- la création de porosité biologique

. *Intégration de plante de couverture dans les systèmes de cultures.*

J'étudie en collaboration avec mes collègues de l'UR 26 Jean-Michel Risède et Gaëlle. Damour les traits fonctionnels d'une quarantaine de plante de couverture parmi lesquels figurent plusieurs espèces de Crotalaires, de Vigna et de Stylosanthes. Les traits fonctionnels étudiés sont relatifs aux fonctions éco-systémiques que ces plantes pourraient assurer au sein d'agro-système:

- . statut hôte vis-à-vis des bio-agresseurs telluriques
- . fixation symbiotique d' N_2
- . biomasse produite
- . vitesse de couverture du sol
- . distribution des racines

Des plantes de couverture d'intérêt sont ensuite sélectionnées et intégrées dans des prototypes de système de culture qui sont évalués sur des dispositifs expérimentaux au champ. J'ai essayé de mobiliser autour de ces dispositifs expérimentaux les compétences de spécialistes de différentes disciplines. Des collaborations avec l'UAG ont notamment été initiées sous forme de co-encadrement de d'étudiants sur les thématiques suivantes :

- (i) Fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses utilisées comme plante couverture (Co-encadrement d'un stage de master 2 en 2008 avec Amadou Bâ)
- (ii) Effet de l'intégration de plante de couverture dans les systèmes de culture bananier sur la diversité de la macrofaune du sol et la porosité biogénique du sol (Co-encadrement de stage de Master 2 en 2009 avec Gladys Loranger-Merciris)
- (iii) Effet de l'intégration de plante de couverture dans les systèmes de culture à base d'ananas sur l'état physique du sol, la régulation du parasitisme tellurique et l'état du système racinaire (Co-encadrement de la thèse de J.C Govindin (2009-2012) avec Amadou Bâ)

Nous avons montré l'intérêt de l'utilisation du soja pérenne (*Neonotonia Wightii*) comme plante de couverture utilisable en jachère assainissante en raison d'un statut de non-hôte des nématodes phytoparasites du bananier. Cette plante peut de plus être maintenue sous couvert de bananiers sans générer de compétition importante pour la ressource minérale et hydrique et permet de contrôler la flore adventice sans utiliser d'herbicides. Une facilitation de la nutrition magnésienne du bananier semble également se produire lorsque le bananier est associé au soja pérenne. L'architecture racinaire du soja pérenne (système sur pivot à extension verticale) semble complémentaire de celle du bananier (système racinaire peu profond à extension horizontale) et permettre la mobilisation de ressources minérales inaccessible au bananier en culture pure.

. Apport de matière organique exogène

L'apport de matière organique exogène permet d'améliorer les caractéristiques physico-chimiques du sol et la biodisponibilité des éléments nutritifs. Il est également susceptible, en constituant une ressource primaire pour le réseau trophique du sol, de favoriser la mise en place de régulation du parasitisme tellurique (Bailey et Lazarovits, 2003 ; Van der Putten et al, 2006) ou le développement d'organismes (macrofaune notamment) améliorant la qualité biophysique du sol (Edwards et Arancon, 2004).

L'effet d'apport de matière organique exogène sur la qualité des sols et la régulation du parasitisme tellurique fait l'objet de la thèse CIFRE de Perrine Tabarant réalisée en partenariat avec la société Verde-Sofunag que je co-encadre avec Jean Roger-Estrade d'AgroParistech. Les hypothèses testées sont : (i) l'apport de matière organique, en restaurant la biodiversité tellurique, contribue à la mise en place de mécanismes de régulation biologique des nématodes phytoparasites et (ii) l'apport de matière organique, en améliorant les conditions édaphiques (porosité, circulation des fluides, biodisponibilité des éléments nutritifs), diminue l'impact des nématodes sur le fonctionnement de la plante.

Cette thèse s'appuie sur des dispositifs expérimentaux au champ que nous cherchons à valoriser en sollicitant différents spécialistes du fonctionnement du sol autour des questions traitées. Nous bénéficions ainsi de l'appui Cécile Villenave (IRD UR SeqBio) pour l'étude des communautés de nématodes et de Christian Steinberg (INRA UMR Microbiologie du sol et de l'environnement) pour l'étude de communautés microbiennes.

Les connaissances acquises sur le fonctionnement de ces systèmes de culture innovants sont valorisées en les intégrant progressivement dans le modèle de simulation des systèmes de culture bananiers SIMBA développé au sein de l'UR26 par Ph.Tixier. Ce modèle permet d'effectuer une évaluation globale et multicritères des systèmes innovants étudiés.

Tabarant P., Villenave C., Risède J.M., Roger-Estrade J., **Dorel M.** Organic amendments control banana parasitism by nematodes.1. Effect of organic amendments on plant growth conditions and plant-parasitic nematode impacts, Plant and Soil (soumis).

Tabarant P., Villenave C., Risède J.M., Roger-Estrade J., Thuriès L., **Dorel M.** Organic amendments control banana parasitism by nematodes.2. Effect of organic materials on soil nematode communities and soil food web structure: consequences for biological regulation of plant-parasitic nematodes. Plant and Soil (soumis)

Rhino B. **Dorel M.**, Tixier P. Risède J.M. 2010. Effect of fallows on population dynamics of *Cosmopolites sordidus*: toward integrated management of banana fields with pheromone mass trapping. *Agricultural and Forest Entomology*, DOI: 10.1111/j.1461-9563.2009.00468

Tixier P., Malézieux E., **Dorel M.**, Wery J. 2008. SIMBA, a model for designing sustainable banana-based cropping systems. *Agricultural systems*, 97 (3) : 139-150.

Chapitre 3. Projet scientifique - Perspectives

3.1 Contexte - Problématique – Question scientifique

J'ai débuté mes activités scientifiques au CIRAD par l'étude de systèmes de monoculture de banane intensifs dans un contexte de stagnation des rendements, de baisse de la fertilité des sols et d'une utilisation croissante de produits phytosanitaires. J'ai mis œuvre pour ceci des approches agronomiques classiques de type enquêtes-diagnostic en milieu réel ou expérimentations au champ afin d'évaluer l'effet des pratiques culturales (travail du sol, traitements phytosanitaires, fertilisation) sur les états du milieu et la croissance de la plante.

Ensuite, avec l'émergence aux Antilles de problèmes environnementaux majeurs liés à la pratique d'une agriculture intensive dans un milieu insulaire fragile et fortement peuplé, je me suis orienté vers l'étude de systèmes de culture en rupture avec les systèmes existants. Suivant les courants de l'agro-écologie (Wezel, 2009) et de l'intensification écologique (Griffon, 2009), je me suis intéressé aux différentes fonctions éco-systémiques pouvant être sollicitées pour obtenir de l'agro-système des services assurés dans les systèmes conventionnels grâce aux intrants chimiques et aux pratiques à mettre en œuvre pour restaurer ces fonctions.

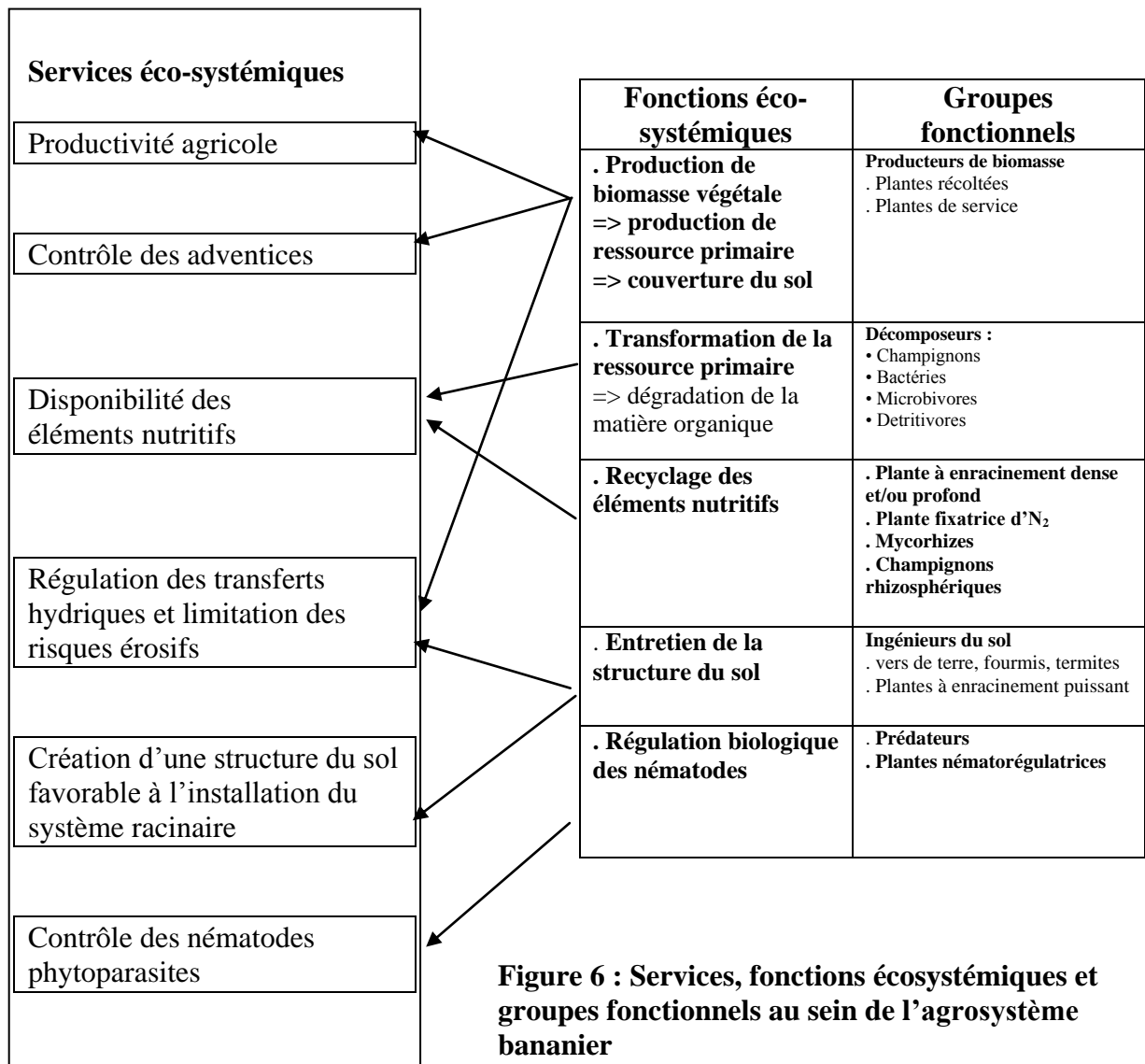
Plusieurs auteurs (Gliesmann 2001, Altieri, 2002, Jackson 2002, Séguy *et al.*, 2006) ont montré que des systèmes de culture traditionnels multi-espèces ou certains écosystèmes naturels tempérés ou tropicaux (prairies, forêts tropicales) pouvaient constituer des modèles pour l'élaboration de système de culture durables. D'après Malézieux *et al.* (2008), la combinaison de plusieurs espèces cultivées au sein de l'agrosystème permet d'obtenir par rapport aux systèmes monospécifiques (1) une plus forte productivité globale (2) une meilleure régulation des bio-agresseurs (3) des services éco-systémiques plus importants (4) une plus forte rentabilité économique.

Après avoir étudié des systèmes de culture bananiers reposant sur la pratique de la jachère, l'implantation de la culture sans travail du sol sur couverture végétale morte ou vivante, j'ai choisi d'articuler mes activités de recherche futures autour de la question suivante :

L'intégration de plantes de services dans les systèmes de culture bananiers permet-elle de restaurer les fonctions écosystémiques de l'agrosystème et de maintenir durablement sa productivité avec un bas niveau d'intrants chimiques ?
--

3.2 Démarche scientifique

Un schéma des relations au sein de l'agrosystème bananier entre, les services que l'on recherche, les fonctions éco-systémiques et les groupes fonctionnels d'organismes assurant ces fonctions est présenté à la figure 6. Sur ce schéma, inspiré des travaux de Kibblewhite *et al.* (2008) et de Brussaard *et al.* (2010), on remarquera qu'un service peut résulter de la combinaison de plusieurs fonctions écosystémiques. Ces fonctions peuvent elle-même être assurées par différents groupes fonctionnels. Ainsi la fonction « production de biomasse végétale » de l'agrosystème qui est la base de la production agricole peut contribuer aussi au contrôle des adventices et à la régulation des flux hydriques en permettant une couverture végétale (vivante ou morte) du sol.



. Les services éco-systémiques recherchés

- Production agricole

Les agrosystèmes étudiés s'insèrent dans des systèmes de production de banane pour l'exportation où un niveau de rendement minimum est nécessaire pour compenser des charges structurelles fixes importantes (Temple et Marie, 2003) L'obtention de niveau de production minimum garantissant la rentabilité du système de culture reste donc un objectif majeur.

- Contrôle de la flore adventice

Les herbicides constituent le principal poste de d'utilisation des pesticides en culture bananière. Les produits utilisés (Glyphosate, Diquat, Glyphosinate) sont d'autre part menacés d'interdiction à court terme en raison de leur impact sur l'environnement. La recherche d'alternatives aux herbicides basées notamment sur l'implantation de couvertures végétales vivantes ou mortes sous bananeraies est un objectif prioritaire pour les producteurs de banane Antillais et pour l'Institut Technique Tropical qui œuvre en partenariat avec le CIRAD à la mise au point de systèmes de culture bananiers à bas niveaux d'intrants chimiques.

- Disponibilité des éléments nutritifs

Les quantités d'engrais appliqués dans les bananeraies conduites de manière intensive dépassent très largement les exportations par la culture. Les apports d'azote sont en effet d'environ 400 kg ha/an pour des exportations inférieures à 100 kg/ha/an. Sous le climat tropical humide des Antilles, les pluviométries annuelles relevées dans les bassins de production bananiers sont comprises entre 2000 et 5000 mm. Dans ces conditions, des apports d'engrais importants semblent nécessaires pour compenser les pertes par lixiviation et le raisonnement de la fertilisation ne permet pas de réduire les apports d'engrais de manière sensible sans réduire la disponibilité des éléments nutritifs (Dorel et al, 2008).

Une réduction des apports d'engrais semble cependant possible tout en maintenant la productivité des bananeraies en intégrant dans l'agrosystème des plantes de service. Une première voie est l'utilisation de plantes à enracinement profond capables, par un effet de complémentarité, de mobiliser des éléments nutritifs dans des zones non accessibles aux racines du bananier (Allen *et al.* 2004, Jobbagy et Jackson 2004, Da Silva *et al.*, 2009). Les travaux de Sansoulet *et al.* (2006) ont montré que les horizons profonds des andosols de Guadeloupe, non explorés par l'enracinement du bananier, présentaient une capacité d'échange anionique permettant la rétention de quantités importantes de nitrates. Les éléments nutritifs contenus dans ces horizons peuvent être prélevés par des graminées à enracinement profond telles que le *Brachiaria* et restituées à la surface du sol lors de la dégradation des litières.

Une deuxième voie pour réduire les apports d'engrais azotés est l'intégration dans l'agrosystème de plantes à fort pouvoir fixateur d'azote atmosphérique (légumineuses) permettant, d'augmenter le stock d'azote bio-disponible et de faciliter la nutrition azotée du bananier.

- Régulation des transferts hydriques et limitation des risques érosifs

Les sols volcaniques des Antilles présentent, sous bananeraie établie, une forte conductivité hydraulique, une forte stabilité structurale et sont couverts d'une litière de résidus de végétaux laissés par les interventions culturales (effeuillage, oeillement, coupe du pied-mère après récolte du régime). Dans ces conditions, la plus grande partie des pluies s'infiltre sans générer de ruissellement (Cattan 2006). Lorsque des épisodes pluvieux très intenses provoquent du ruissellement, la présence de résidus végétaux à la surface du sol ralentit le flux d'eau et les risques érosifs restent limités (Khamsouk 2001, Rishirumhirva 1997). Cependant lors de la replantation des bananeraies, qui s'effectue en moyenne tous les 5 ans, le sol est travaillé, les résidus végétaux sont enfouis et le sol est laissé sans couverture pendant une grande partie du 1^{er} cycle de culture. Pendant cette période, les risques érosifs peuvent être plus importants surtout si des passages d'engins occasionnant un tassement du sol et une réduction de sa conductivité hydraulique sont effectuées en cours de culture pour l'application d'herbicides et d'engrais. Dans ces conditions l'installation d'une plante de service assurant une couverture vivante (ou morte) entre les lignes de bananier permet de limiter les risques d'érosion.

- Création d'une structure du sol favorable à l'installation du système racinaire

La préparation des sols pour l'installation d'une bananeraie est basée, dans les systèmes de culture conventionnels, sur une mécanisation lourde faisant appel à des engins de traction puissants et à des outils travaillant le sol à grande profondeur. Ces travaux ont un coût énergétique important et conduisent à terme à une réduction de la fertilité des sols (Dorel *et al.* 2000, Clermont-Dauphin *et al.* 2004). L'obtention d'une structure du sol favorable à l'enracinement du bananier semble cependant pouvoir être obtenue sans recourir au travail du sol en utilisant les effets de plante de service (Carof *et al.* 2007 ; Dorel *et al.*, 2010).

- Contrôle des nématodes phytoparasites

Les dégâts occasionnés par les nématodes phytoparasites entraînent la chute des bananiers et une perte totale de production. Ces parasites restent une contrainte majeure dans les systèmes de monoculture bananière qui contraignent à l'utilisation de produits nématicides à très forte toxicité. Les populations de ces parasites peuvent cependant être abaissées sans utiliser de nématicides en interrompant périodiquement la culture bananière et en implantant pendant les phases d'inter-culture des plantes non-hôte de nématodes (Risède *et al.*, 2009). Ces méthodes alternatives restent cependant à améliorer pour maintenir la pression parasitaire à des niveaux suffisamment bas pour éviter les pertes de production pendant toute la durée de vie de la bananeraie.

. Les groupes fonctionnels sollicités

Nous avons identifié 5 fonctions éco-systémiques majeures de l'agrosystème dans lesquelles sont impliqués des groupes fonctionnels constitués, soit d'espèces végétales cultivées, soit de communautés d'organismes associées se développant spontanément dans l'agro-système (figure 6).

L'augmentation de la diversité des espèces cultivées induit, en entraînant une diversification de la ressource primaire et des habitats, une augmentation de la diversité associée (Vandermeer *et al.*, 1998).

L'introduction de plantes nouvelles est donc susceptible de modifier le fonctionnement de l'agro-système par des effets directs (colonisation du sol par les racines, prélèvements d'éléments nutritifs, production de biomasse végétale) mais aussi par des effets indirects en favorisant le développement de certaines communautés assurant des fonctions importantes (décomposeurs, ingénieurs du sol, prédateurs).

On cherchera à mobiliser plus particulièrement, pour améliorer le fonctionnement de l'agro-système, les groupes fonctionnels suivants:

. Les producteurs de biomasse

Ce sont principalement des plantes de service ou des plantes récoltées produisant des quantités importantes de biomasse aérienne ou racinaire.

Ces plantes fournissent la ressource organique primaire et des habitats pour les organismes constituant le réseau trophique du sol. Elles orientent la composition des complexes parasitaires en fonction de leur statut d'hôte. Elles orientent également, en fonction de leurs caractéristiques biochimiques (teneur en lignine, cellulose, hémicellulose, sucres solubles), les filières de dégradation vers différentes voies (bactérienne ou fongique).

Ces plantes permettent également de constituer une couverture qui protège le sol de l'érosion hydrique et contrôle la flore adventice.

- Les plantes à enracinement profond

Il s'agit de plantes présentant une distribution racinaire complémentaire de celle de bananier. Le bananier possède en effet des racines à croissance indéterminées qui s'étendent horizontalement et colonisent surtout les horizons de surface. Les plantes à enracinement profond permettent de capturer des ressources minérales dans les horizons profonds inaccessibles au bananier et de les restituer en surface sous forme de litières. Les plantes à enracinement sur pivot plongeant verticalement sont particulièrement intéressantes car leur densité racinaire est faible dans les horizons de surface prospectés par le bananier et reste importante dans les horizons sous-jacents (*Neonotonia Wightii*, *Vigna Inguiculata*, ...).

- Les plantes fixatrices d'azote atmosphérique

Ces plantes sont des légumineuses. Il faut cependant noter que l'intensité de la fixation symbiotique peut-être très variable à l'intérieur de ce groupe. D'abord en

raison de la difficulté à trouver une souche bactérienne efficace avec certaines espèces. *Neonotonia Wightii* (soja pérenne) est par exemple connu pour ne développer une symbiose fixatrice d'azote qu'avec un nombre très réduit de souche de *Rhizobium*. Ensuite parce que dans des sols fortement pourvus en azote comme le sont les sols de bananeraie, la fixation symbiotique d' N₂ est moins active.

- Les ingénieurs du sol

Ce groupe comprend des invertébrés tels que les vers de terre, fourmis, termites (Lavelle *et al.*, 1997) qui créent par leur activité des structures biogéniques qui améliorent les propriétés physiques du sol (conductivité hydraulique, stabilité structurale, aération).

On peut inclure dans ce groupe des plantes qui améliorent également la structure du sol par l'action de leurs racines, l'architecture du système racinaire déterminant la morphologie et la taille du réseau de pores créé.

- Les plantes némato-régulatrices

Les plantes sont susceptibles de réguler les nématodes phytoparasites tout d'abord à travers leur statut d'hôte. Elles peuvent en effet offrir une ressource alimentaire et/ou un habitat qui favorisent plus ou moins la multiplication des nématodes phytoparasites. Elles peuvent aussi avoir des effets allélopathiques qui réduisent le développement des populations de nématodes. Des plantes telles que les crotalaires (*Crotalaria spp.*), l'œillet d'Inde (*Tagetes spp*) ou la moutarde (*Brassica spp*) contiennent des substances (alcaloïdes, polythienils, glucosinolates,...) connues pour leurs effets toxiques sur les nématodes (Chitwood, 2002).

- Les prédateurs de nématodes phytoparasites

Les travaux effectués dans le cadre de la thèse de P.Tabarant ont montré que la prédation par des nématodes carnivores était une voie de régulation des nématodes phytoparasites du bananier qui pouvait être stimulée en injectant dans le réseau trophique du sol des matières organiques à rapport C/N élevé riches en lignine et cellulose. Les plantes de service, à travers la composition biochimique de leurs litières, peuvent être utilisées pour améliorer la structure du réseau trophique du sol et favoriser le développement de ces communautés de prédateurs.

. La conception et l'évaluation de systèmes de culture bananiers multi-espèces

La conception et l'évaluation de système de culture bananiers multi-espèces est une tâche complexe en raison (i) du grand nombre d'espèces pouvant être associée au bananier et (ii) de la multitude de combinaisons possibles pour associer, dans le temps et dans l'espace, ces espèces entre elles et avec le bananier.

Nous avons choisi d'aborder la conception de système de culture (sélection de plantes de service, définition de leur mode d'intégration dans l'agro-système) à partir d'une approche « trait fonctionnel ».

- Intérêt de l'approche trait fonctionnel

Cette approche issue de l'écologie (Lavorel et Garnier, 2002) est peu utilisée en agronomie. Elle permet de classer les espèces non pas à partir de critères taxonomiques mais partir de traits caractérisant la manière dont elles influent sur le fonctionnement de l'écosystème et dont elles réagissent à leur environnement. Nous faisons l'hypothèse qu'une telle approche peut servir de base à la conception de systèmes de culture bananiers innovants reposant sur l'utilisation de plantes de services, d'abord pour sélectionner les plantes en fonction des services attendus, ensuite pour définir les modalités de leur intégration dans l'agro-système de manière à en améliorer le fonctionnement et les performances.

L'évaluation des systèmes élaborés reposera sur le couplage de l'expérimentation et de l'utilisation de modèles de simulation.

- Apport de la modélisation

La modélisation sera utilisée comme aide à l'évaluation des performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture innovants que nous proposons. Le modèle doit permettre l'évaluation des services éco-systémiques attendus (niveau de production de la bananeraie, contrôle des adventices, disponibilité des éléments nutritifs, régulation des transferts hydriques et des risques érosifs, amélioration de la structure du sol, régulation des nématodes phytoparasites). Il n'est pas attendu du modèle une quantification précise de ces différents services mais qu'il puisse fournir les éléments permettant la construction d'indicateurs pour leur évaluation. Nous proposerons dans ce but des améliorations et des modules complémentaires au modèle de simulation de culture du bananier SIMBA (Tixier et al., 2008) en y intégrant notamment l'effet de limitations des ressources minérales et hydriques liées à la présence d'une plante de service sur la croissance du bananier.

3. 3 Structuration des activités - Projets de recherche

Mes activités se structureront autour de 2 axes

. Axe 1 Intégration de plantes de service dans l'agrosystème et restauration des fonctions écosystémiques

Les activités sur cet axe se déclineront sous forme de deux projets. Le projet 1 visera la conception de systèmes de culture bananiers intégrant des plantes de service à partir de l'étude de leurs traits fonctionnels et le projet 2 l'évaluation de l'effet de l'intégration de plantes de service dans l'agro-système sur la restauration de ses fonctions éco-systémiques

Projet 1 : Conception de systèmes de culture innovants et traits fonctionnels des plantes de service

Les travaux s'inscrivent dans le cadre du projet «Plan banane durable » conduit en partenariat entre le CIRAD et l'Union des Producteurs de Banane Antillais. Ce projet

visent la mise en point de systèmes de culture bananiers innovants à bas niveaux d'intrants chimiques pour les Antilles françaises (Martinique, Guadeloupe) et les îles productrices de bananes environnantes (République Dominicaine, Windward Islands). Il s'agit de proposer des systèmes de culture intégrant des plantes de services et répondant aux objectifs et aux contraintes de différents systèmes de production bananiers antillais.

Un ensemble de traits fonctionnels est observé sur la collection de plantes de service de la station CIRAD de Neufchâteau (40 espèces). L'analyse de ces traits permet de raisonner l'intégration de ces plantes de service, dans l'espace et dans le temps, au sein de l'agro-système bananier en recherchant des relations de complémentarité (au niveau de l'interception de la lumière par les parties aériennes ou des éléments nutritifs par les systèmes racinaires des différentes espèces associées) ou de facilitation (en utilisant l'aptitude de certaines espèces à améliorer la croissance des autres espèces qui leur sont associées). L'analyse des traits fonctionnels permet aussi d'évaluer la contribution de ces plantes à la réalisation des différentes fonctions écosystémiques que l'on cherche à promouvoir (couverture du sol, entretien de la structure, recyclage des éléments nutritifs, régulation des nématodes phyto-parasites).

Les traits suivants sont plus particulièrement observés:

- la densité et la distribution des racines
- l'abondance de nodosités et l'aptitude à fixer l' N_2
- la vitesse de croissance potentielle de la plante
- les caractéristiques biochimiques des tissus
- le statut d'hôte vis-à-vis des nématodes

Cette étude des traits fonctionnels constitue donc la base scientifique et technique pour la conception de systèmes de culture bananiers reposant sur l'utilisation de plantes de service. Elle permet de proposer des prototypes de système de culture qui seront évalués en parcelles expérimentales et à l'aide d'un modèle de simulation de culture (modèle SIMBA).

Projet 2 : Plantes de service et restauration des fonctions écosystémiques

Nous proposons d'étudier l'effet de l'intégration de plantes de service dans l'agro-système bananier sur les fonctions suivantes:

. Entretien de la structure du sol

L'intégration dans le système de culture de plantes à enracinement puissant permet d'améliorer la structure du sol (i) par l'action des racines : action mécanique directe, agrégations des particules par les exsudats racinaires (Lesturgez *et al.*, 2004), (ii) par la création d'habitats et de ressources favorisant le développement de communautés d'ingénieurs du sol (vers de terre, fourmis, termites) et la création de structures biogéniques stables (galeries, agrégats) (Thies et Grossman, 2006, Barros *et al.* 2002 ; Barros *et al.* 2003).

L'étude de cette fonction d'entretien de la structure du sol, a été initiée pour des systèmes de culture Ananas/Stylosanthes dans le cadre de la thèse de Jean-Claude Govindin dont j'assure l'encadrement. A cette occasion une collaboration avec les équipes de l'INRA de Rennes et d'AgroParisTech travaillant sur la caractérisation de structures biogéniques (V.Hallaire, M.Carof, J. Roger-Estrade) à partir d'échantillons

de sols imprégnés de résine a été entreprise. Le savoir-faire acquis sera mis à profit pour étudier les effets de plantes de services présentant différents traits racinaires (enracinement sur pivot ou fasciculé, turnover racinaire rapide ou lent, composition biochimique des racines,...) sur la structure et le fonctionnement hydrique du sol ainsi que sur la mise en place du système racinaire du bananier. Cette étude fait l'objet du projet thèse 1 présenté en encadré.

. Régulation des nématodes phytoparasites

Les travaux entrepris au cours de la thèse de P. Tabarant ont montré que les populations de nématodes phytoparasites du bananier pouvaient être régulées par des apports de matière organique. Les diverses communautés de nématodes du sol (nématodes phytoparasites et nématodes libres) ont été identifiées et regroupées en guildes fonctionnelles (Bongers and Bongers, 1998). L'analyse de ces guildes fonctionnelles a permis d'évaluer l'état du réseau trophique du sol (Ferris *et al*, 2001) et de formuler des hypothèses sur les mécanismes de régulation des nématodes phytoparasites (impliquant notamment la prédation) induits par les apports de matière organique.

Ces travaux seront poursuivis en cherchant à évaluer l'effet de différents constituants de la matière organique (lignine, cellulose, sucres solubles) sur la structure des réseaux trophiques du sol et sur les communautés qui les composent. Après détermination de la composition des restitutions organiques de différentes plantes de service on tentera de plus d'évaluer l'effet de la nature des couverts végétaux et des restitutions organiques associées sur les communautés et la dynamique des nématodes phyto-parasites. Ces travaux s'articuleront autour d'un projet de thèse dirigée par J.M. Risède que je contribuerai à encadrer (voir projet de thèse 2 en encadré).

. Recyclage des éléments nutritifs

Dans les systèmes de monoculture bananière conventionnels sous climat tropical humide, une part importante des éléments nutritifs apportés par la fertilisation est perdue par lixiviation (Godefroy *et al*. 1975, Dorel *et al*. 2008). L'importance des flux de drainage et l'enracinement peu dense et peu profond du bananier semblent être à l'origine de ces pertes. L'intégration de plantes de services dans l'agro-système est susceptible d'améliorer sa capacité à intercepter les flux de solutés et donc à limiter les pertes d'éléments nutritifs. Cependant le maintien de la productivité de la bananeraie implique également que les interactions entre plantes ne réduisent pas la disponibilité des ressources pour le bananier. Il convient donc d'associer, dans le temps et dans l'espace, les différentes espèces cultivées afin que la distribution spatiale des racines et les rythmes d'absorption et de restitutions des éléments nutritifs permettent une mobilisation optimale des ressources en minimisant la compétition entre plantes.

Après avoir identifié des plantes de service candidates capables de mobiliser des ressources dans les horizons profonds non accessibles au bananier et n'entrant pas en compétition avec celui-ci pour le prélèvement d'éléments nutritifs dans les horizons superficiels à partir de l'analyse de leurs traits fonctionnels (traits racinaires, rythme de développement, biomasse produite), nous élaborerons un prototype d'agro-système associant bananier et plante de service. Ce prototype sera évalué en parcelle expérimentale en le comparant à une bananeraie en culture pure. Les flux de solutés seront mesurés au moyen de lysimètres et de case de ruissellement. Les résultats

seront interprétés en intégrant la dynamique de mise en place des systèmes racinaires ainsi que celles des restitutions organiques et d'absorption des éléments nutritifs. Ces dernières seront déterminées en utilisant le modèle de simulation de culture bananière SIMBA.

L'objectif de ces travaux est d'établir un bilan des éléments nutritifs intégrant les pertes par lixiviation, l'absorption par les plantes et le stockage et la minéralisation au niveau du compartiment organique du sol.

Ces travaux seront conduits en collaboration avec mes collègues de l'UR 26 G.Damour et Ph. Cattan dans le cadre du projet AgroEcotrop. Ce projet qui réunit le CIRAD, l'INRA et l'UAG, a pour objectif d'approfondir certaines questions capitales pour la compréhension de processus agro-écologiques et une gestion durable des agro-systèmes tropicaux et notamment celle du rôle, dans des systèmes poly-culturels, des espèces associées sur le maintien de la fertilité des sols et le contrôle des bio-agresseurs.

Axe 2 : Fonctionnement de la plante dans le cadre de systèmes multi-espèces à bas niveaux d'intrants chimiques

Les systèmes intensifs conventionnels visent à simplifier la gestion des peuplements végétaux (peuplements monospécifiques) et à placer la plante dans des conditions de croissance optimales. Les bio-agresseurs sont contrôlés par l'application de pesticides et les besoins en eau et en éléments nutritifs sont satisfaits par l'apport d'engrais chimiques et l'irrigation. Les pratiques d'intensification écologique, et notamment celles intégrant de plantes de services dans le système de culture, génèrent des conditions de croissance de la plante plus complexes que dans les systèmes conventionnels. Les interactions entre plantes peuvent par exemple provoquer une compétition pour les ressources et des conditions nutritionnelles limitantes. De plus, en conditions d'intensification écologique, le contrôle des bio-agresseurs est effectué en recourant à des méthodes prophylactiques et/ou des régulations biologiques qui ne permettent généralement qu'un contrôle partiel de leur impact sur la culture.

Dans le cas de systèmes de cultures bananiers à bas niveaux d'intrants chimiques intégrant des plantes de service, le système racinaire occupe une position centrale. D'abord parce que le système racinaire conditionne la répartition des ressources minérales et hydriques entre les espèces cultivées. Ensuite parce qu'il est soumis à des contraintes biotiques ou abiotiques liées à des états du milieu résultant de l'activité d'organismes vivants souvent moins favorables au bananier que dans les systèmes de culture conventionnels ou l'application de pesticides et le travail du sol permettent de contrôler le parasitisme tellurique et l'état physique du sol.

Notre objectif est d'étudier et de modéliser la croissance et le développement du bananier dans des systèmes de culture où les conditions d'accès aux ressources du sol sont limitées par la compétition entre espèces et des contraintes biotiques et abiotiques sur le système racinaire.

Plusieurs auteurs ont étudiés les effets des paramètres climatiques (rayonnement, température) sur le développement et la production de biomasse du bananier (Israëli 1995, Turner 1995, Eckstein et al. 1995). Les résultats concernant l'allocation

d'assimilats aux différents organes sont cependant fragmentaires et les règles de répartition restent très floues. Le transfert d'assimilats du pied-mère au rejet constitue pourtant un paramètre clé pour simuler plusieurs cycles de culture successifs.

Les activités entreprises sur l'axe 2 seront les suivantes :

. Nous chercherons tout d'abord à calibrer un modèle de croissance du bananier en nous appuyant sur les travaux de modélisation antérieurs (STICS-banane, SIMBA). Il s'agira principalement de déterminer les règles de répartition de la biomasse produite sur plusieurs cycles production entre le pied-mère, le régime et les rejets. Ce travail sera réalisé en faisant varier les rapports source/puits par l'ablation de feuilles, de rejets ou du régime. Les expérimentations seront réalisées en Guadeloupe et au Cameroun en collaboration avec mes collègues de l'UR 26 G.Damour, S.Dépigny et Ph.Tixier.

. Nous introduirons ensuite dans le modèle un effet de limitation des ressources sur la croissance et le développement par des indices de contraintes nutritionnelles qui modifieront la vitesse de développement et l'efficacité de conversion de la lumière. Ces indices traduiront un niveau de disponibilité de l'eau et des éléments minéraux en intégrant la distribution spatiale et l'état des racines.

Les jeux de données nécessaires au calibrage et à la validation d'un tel modèle sont soit disponibles (expérimentations anciennes) et soit en cours d'acquisition sur des dispositifs expérimentaux destinés à évaluer des prototypes de systèmes de culture bananiers innovants reposant sur l'utilisation de plantes de service dans différentes zones pédo-climatiques de la Guadeloupe. Ces dispositifs ont été mis en place dans le cadre de la plateforme « Système de culture bananiers innovants » du projet « Plan Banane Durable » dont j'assume l'animation. Cette plateforme sur laquelle interviennent en partenariat le CIRAD et l'Institut Technique Tropical a pour objectif la mise au point de systèmes de culture bananiers reposant sur l'utilisation de plantes de service.

Projet de thèse 1

Effet de l'intégration de plantes de service dans l'agro-système bananier sur la structure du sol – Relation avec les traits fonctionnels de la plante

L'intégration de plante de service dans l'agro-système est susceptible d'induire une amélioration de la structure du sol par deux voies :

(i) Le développement du système racinaire des plantes crée un réseau de pores dont les caractéristiques morphologiques et la stabilité sont liées à l'architecture et à l'activité du système racinaire (formation de pores tubulaires correspondant aux trajets racinaires, retrait et fissuration du sol liés au prélèvement d'eau, stabilisation des agrégats par les exsudats racinaires)

(ii) La biomasse restituée au sol par les plantes de service constitue une ressource primaire pour le réseau trophique du sol et notamment pour les communautés d'ingénieurs du sol. Ces organismes (vers de terre, fourmis, termites,...) produisent des structures biogéniques (turricules, galeries) qui contribuent à améliorer la porosité du sol. La composition biochimique des litières restituées est susceptible d'influer sur la composition de ces communautés et donc de modifier leurs effets sur la structure du sol.

Dans un objectif de conception de systèmes de culture innovants, il est nécessaire de définir les modalités d'intégration des plantes de service dans l'agro-système bananier en fonction de leurs traits fonctionnels, de manière à optimiser leurs effets sur la structure du sol.

Questions traitées

Question 1:

L'intégration de plante de service dans l'agro-système bananier permet-elle d'améliorer la structure du sol ?

Question 2:

Les traits des parties aériennes et souterraines des plantes de service permettent-ils de prévoir leurs effets sur la structure du sol ?

Démarche et méthodes

On choisira tout d'abord un ensemble de plantes de services contrastées au niveau de leurs traits racinaires (architecture du système racinaire, densité, diamètre et longueur et racines,...), de leur durée de vie, de la quantité de biomasse produite et de leur composition biochimique.

Dans le cadre d'un dispositif expérimental, ces plantes seront, en fonction de leurs traits, soit implantées en phase d'inter-culture, soit utilisées comme couverture vivante du sol sous bananeraie. On observera sur ce dispositif plus particulièrement:

- . La morphologie des pores sur des monolithes de sol imprégnés de résines (Hallaire et Curmi, 1994)
- . La distribution des racines en cartographiant les impacts racinaires sur des plans horizontaux et verticaux
- . La diversité et l'abondance des communautés d'invertébrés de la macrofaune du sol

Projet de thèse 2

Restauration écologique des sols : Analyse des traits de réponses des communautés de nématodes des sols à l'implantation de plantes de couverture dans un agrosystème bananier en phase d'inter-culture

La diversité, la qualité, la quantité et le mode de restitution des ressources organiques générées par des couverts mono ou plurispécifiques de plantes de couverture sont susceptibles d'impacter le fonctionnement d'un sol de qualité biologique dégradée, et en particulier la dynamique d'évolution, la structure et l'orientation des successions écologiques des réseaux trophiques de ce sol. Une meilleure connaissance de l'incidence de ces paramètres, devrait contribuer à mieux les « manipuler », à des fins de restauration des fonctions et services éco-systémiques.

L'objectif de la thèse est d'étudier les effets de plantes de couverture sur le bio-fonctionnement d'un sol de qualité biologique dégradée en ciblant:

- . La dynamique d'évolution des réseaux trophiques du sol
- . Les changements affectant deux fonctions majeures et les services éco-systémiques qui leur sont associés: la régulation de bio-agresseurs telluriques et la transformation de la ressource primaire (disponibilité des éléments nutritifs lié à la biodégradation des litières).

Questions traitées

Question 1: Comment l'identité spécifique des plantes de couverture, ou la diversité de mélanges à base de plantes de couverture affectent-elles les réseaux trophiques et le fonctionnement biologique d'un sol de bananeraies en phase d'inter-culture

Question 2: Quels sont les effets de la qualité, de la quantité, et du mode d'apport de litière de plantes de couverture sur le fonctionnement biologique d'un sol d'inter-culture?

Question 3: Quels liens existe-t-il entre la structure fonctionnelle des communautés de nématodes du sol et d'autres bio-indicateurs choisis de la qualité de sols?

Démarche et méthodes

Un diagnostic des réseaux trophiques du sol sera d'abord effectué à partir de l'analyse des communautés de nématodes. Après avoir mesuré l'abondance des peuplements de nématodes parasites ou libres, des indices de diversité des guildes fonctionnelles de nématodes et des indices écologiques de bio-fonctionnement du sol seront calculés. Les trajectoires de réponse de ces communautés de nématodes seront analysées à l'aide du modèle de Ferris et al. (2001).

La fonction de régulation des nématodes phytoparasites sera évaluée par l'analyse de la dynamique d'évolution du potentiel infectieux du sol en nématodes phytoparasites (tests biologiques en pots) et de la dynamique d'évolution de la guildes des nématodes phytoparasites, au sein des communautés de nématodes du sol.

La fonction de transformation de la ressource primaire sera évaluée à travers (i) les dynamiques de dégradation des litières et d'évolution des différentes fractions de la matière organique du sol (fraction labile, stable et récalcitrante) et (ii) la dynamique de l'azote minéral et de l'azote microbien du sol.

Chapitre 4. Références bibliographiques

- Allen, S.C. et al., 2004.** Safety-net role of tree roots: evidence from a pecan (*Carya illinoensis* K. Koch)-cotton (*Gossypium hirsutum* L.) alley cropping system in the southern United States. *Forest Ecology and Management*, 192(2-3): 395-407.
- Altieri M.A., 2002.** Agroecology : the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agriculture, ecosystems and environment*, 93, 1-24.
- Bailey K.L., Lazarovits G., 2003.** Suppressing soil-borne diseases with residue management and organic amendments *Soil & Tillage Research*, 72, 169–180
- Barros, E., Curmi, P., Hallaire, V., Chauvel, A. & Lavelle, P. 2001.** The role of macrofauna in the transformation and reversibility of soil structure of an oxisol in the process of forest to pasture conversion, *Geoderma* 100, 1-2, 193-213.
- Barros, E., Pashanasi, B., Constantino, R. & Lavelle, P. 2002.** Effects of land-use system on the soil macrofauna in western Brazilian Amazonia. *Biology and fertility of soils*, 35, 338-347.
- Bongers T., Bongers M. 1998.** Functional diversity of nematodes. *Applied Soil Ecology*. 10, 239-251
- Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoullaud, P. Gate, F. Devienne-Barret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J.M. Machet, J.M. Meynard and R. Delecolle 1998.** STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie*. 18, 311-346.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003.** An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.*, 18, 309–332.
- Brussaard L., Caron P., Campbell B., Lipper L., Mainka S., Rabbinge R., Babin D., Pulleman M. 2010** Reconciling biodiversity conservation and food security: scientific challenges for a new agriculture. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2, 34–42.
- Carof M., de Tourdonnet S, Coquet Y., Hallaire V. Roger-Estrade J. 2007.** Hydraulic conductivity and porosity under conventional and no-tillage and the effect of three species of cover crop in northern France. *Soil Use and Management*, 23, 230–237.
- Casper, B.B. and R.B. Jackson 1997.** Plant competition underground. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 28, 545-570.

Cattan P., Cabidoche Y.M., Lacas J.G., Voltz M. 2006. Effect of tillage and mulching on runoff under banana (*Musa spp.*) on a tropical Andosol. *Soil and Tillage Research*, 86, 38-51.

Célette, F., A. Findeling and C. Gary 2009. Competition for nitrogen in an unfertilized intercropping system: The case of an association of grapevine and grass cover in a Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy*. 30, 41-51.

Chitwood D.J. 2002. Phytochemical based strategies for nematode control. *Annu. Rev. Phytopathol.* 40, 221-49

Clermont-Dauphin C. Cabidoche Y.M., Meynard J.M. 2004. Effects of intensive monocropping of bananas on properties of volcanic soils of uplands of the French West Indies, *Soil Use and Manangement*, 20, 1-9.

Da Silva E.V, de Moraes Gonçalves J. L., de Freitas Coelho S. R., Moreira e Moreira R., de Miranda Mello S. L., Bouillet J.P., Jourdan C., Laclau J.P., 2009. Dynamics of fine root distribution after establishment of monospecific and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. *Plant and Soil*, DOI 10.1007/s11104-009-9980-6.

Daudin, D. and J. Sierra 2008. Spatial and temporal variation of below-ground N transfer from a leguminous tree to an associated grass in an agroforestry system. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 126, 275-280.

Delvaux B., Dorel M. 1990. Enquêtes diagnostics réalisées en bananeraies intensives du Cameroun, de la Martinique et de la Guadeloupe *Fruits (spéc.)* : 89-93.

Dorel M. Roger-Estrade J., Manichon H. Delvaux B. 2000. Porosity and Soil-Water Properties of Caribbean volcanic ash soil. *Soil Use and Management*, 16, 133-140.

Dorel M., Achard R., Tixier P. 2008. SIMBA-N: Modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean. *European Journal of Agronomy*, 29 (1), 38-45.

Dorel M., Lakhia S., Pététin C., Bouamer S., Risède J.M., 2010. No till banana planting on crop residue mulch. Effect on soil quality and crop functioning. *Fruits*, 65,, 2, 55-68.

Eckstein K., J.C. Robinson & S.J. Davie. 1995. Physiological responses of banana (*Musa* AAA; Cavendish sub-group) in the subtropics. III. Gas exchange, growth analysis and source-sink interaction over a complete crop cycle. *J. Hortic.Sci.* 70 (1), 169-180.

Ewards C.A., Arancon N.Q., 2004. Interactions among Organic Matter, Earthworms, and Microorganisms in Promoting Plant Growth. *In* : *Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. Magdoff and Weil Eds. CRC Press.

- Ferris H., Bongers T., de Goede R.G.M., 2001.** A framework for soil food web diagnostics : extension of the nematode faunal analysis concept. *Applied Soil ecology*, 18, 13-29.
- Gliesmann S.R. 2001** Agroecosystem sustainability: developing practical strategies, CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Godefroy J., Roose E., Muller M. 1975** Estimation des pertes par les eaux de ruissellement et de drainage des éléments fertilisants dans un sol de bananeraie du sud de la Côte d'Ivoire. *Fruits*, 30, 4, 223-235.
- Granier A., 1985.** Une nouvelle méthode pour la mesure de flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann. Sci. For.*, 44, 1-14
- Griffon M. 2009.** Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive et à haute valeur environnementale? *Pour.* 202-203, 39-47
- Habib, R., L. Pagès, M.O. Jordan, T. Simonneau and M. Sébillotte 1991.** Approche à l'échelle du système racinaire de l'absorption hydro-minérale. Conséquences en matière de modélisation. *Agronomie*. 11:623-643.
- Hallaire, V., Curmi, P. 1994.** Image analysis of pore space morphology in soil sections, in relation to water movement. In: *Soil micromorphology: studies in management and genesis. Proceedings of the Ninth International Working Meeting on Soil Micromorphology* (eds A.J. Ringrose-Voase, G.S. Humphreys), pp. 559–567. Elsevier, Amsterdam.
- Israeli Y., Plaut Z., Schwartz A., 1995.** Effect of shade on banana morphology, growth and production. *Scientia Horticulturae*, 62, 1-2, 45-56.
- Jackson W., 2002.** Natural systems agriculture: a truly radical alternative. *Agriculture Ecosystems and Environment* 88, 111-117.
- Jobbagy E.G., Jackson R.B., 2004.** The uplift of soil nutrients by plants: biogeochemical consequences across scales. *Ecology*, 85, 2380–2389
- Jose, S., R. Williams and D. Zamora 2005.** Belowground ecological interactions in mixed-species forest plantations, Ballina, AUSTRALIA, pp. 231-239.
- Khamsouk B. 2001.** Influence des systèmes de culture bananiers sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes de nutriments sur un sol volcanique en Martinique. Thèse ENSA Montpellier, 214 p.
- Kibblewhite M.G., Ritz K., Swift J. 2008.** Soil health in agricultural systems. *Phil. Trans. R. Soc. B* 363, 685–701
- Lacas, J.-G., Voltz, M., Gouy, V., Carluer, N. and Gril, J.J., 2005.** Using grassed strips to limit pesticide transfer to surface water: a review. *Agron. Sustain. Dev.*, 25: 253–266.

Lavelle, P., Bignell, D., Lepage, M., Wolters, V., Roger, P., Ineson, P., Heal, O.W., Dhillon, S., 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *Eur. J. Soil Biol.* 33, 159-193.

Lavorel S., Garnier E., 2002. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. *Functional Ecology*, 16, 545-556.

Le Bissonais Y., 1996. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology, *European Journal of Soil Science*, 47, 425-437.

Lecompte F. 2002. Mise en place de l'architecture racinaire du bananier dans un andosol : effets des contraintes physiques liées au compactage. Thèse INA-PG, 113 p.

Lesturgez G., Poss R., Hartmann C., Bourdon E., Noble A., Ratana-Anupap S. 2004. Roots of *Stylosanthes hamata* create macropores in the compact layer of a sandy soil, *Plant and Soil*, 260, 101-109.

Li, L., J.H. Sun, F.S. Zhang, T.W. Guo, X.G. Bao, F.A. Smith and S.E. Smith 2006. Root distribution and interactions between intercropped species. *Oecologia*. 147:280-290.

Malézieux, E., Y. Crozat, C. Dupraz, M. Laurans, D. Makowski, H. Ozier-Lafontaine, B. Rapidel, S.d. Tourdonnet and M. Valantin-Morison 2008. Mixing plant species in cropping systems: concepts, tools and models. A review. *Agronomy for sustainable development*. 28, 2-20.

Manichon H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural. Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse INA-PG.

Milburn J.A., Kallarackal ., Baker D.A., 1990. Water relation of the banana. Predicting the water relations parameters of banana using exuding latex. *Australian Journal of Plant physiology*, 35, 299-319.

Mukasa, H.H., D. Ocan, D. De Waele, P.R. Rubaihayo and G. Blomme 2006. Effect of a multispecies nematode population on the root, corm, and shoot growth of East African *Musa* genotypes. *Biology and Fertility of Soils*, 43, 229-235.

Perroux K.M., White I., 1988. Design for disc permeaters. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 1205-1215.

Risède J.M., Chabrier C., Dorel M., Rhino B., Lakhia K., Jenny C., Quénéhervé P. 2009. Recent and Up-Coming strategies to counter plant-parasitic nematodes in banana cropping systems of the French West Indies. *Acta Horticulturae*, 828, 117-128. In D. Jones, I. Van den Bergh (eds.) *Proceedings of the International Symposium on Recent advances in Banana Crop Protection for Sustainable and Improved Livelihoods*, 2007/09/10-14, White River, South Africa.

Rishirumuhirva T. 1997. Rôle du bananier dans le fonctionnement des exploitations agricole sur les hauts plateaux de l'Afrique orientale. Thèse Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 321 p.

Roose E., Asseline 1978. Mesures des phénomènes d'érosion sous pluies simulées aux cases d'érosion d'Adipodoumé. Cah.Orstom., Série Pédol. XVI, 1, 43-72

Sala G.H., Tessier D., 1994. Rétention de l'eau par les matériaux argileux : signification et prévision. Compte-rendu de l'académie des Sciences, série II, 318, 381-388.

Sansoulet J., Cabidoche Y.M., Cattan P. 2006. Adsorption and transport of nitrate and potassium in an Andosol under banana (Guadeloupe, french West Indies). European Journal of Soil Science, 58, 478-489.

Sansoulet, J., Cabidoche, Y.-M., Cattan, P., Ruy, S., Simunek, J. 2008. Spatially Distributed Water Fluxes in an Andisol under Banana Plants: Experiments and Three-Dimensional Modeling. Vadose Zone Journal 7, (2), 819-829.

Séguy L., Bouzinac S., Husson O. 2006. Direct-seeded tropical soil systems with permanent soil cover: learning from Brazilian experience. In: "Biological approaches to sustainable soil systems", Uphoff N.; Ball A.S.; Fernandes E.; Herren H.; Husson O.; Laing M.; Palm C.; PrettyJ.; Sanchez P.; Sanginga N.; Thies J. Eds, CRC Press, New York, USA.

Schenk, H.J. 2006. Root competition: beyond resource depletion. Journal of Ecology. 94:725-739.

Seiter S., Horwath W.R. 2004. Strategies for managing soil matter to supply plant nutrients. In Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture. Magdoff et Weill Ed. CRC Press

Shoji S., Nanzyo M., Dahlgren R.A., 1993 - Volcanic Ash Soils, Genesis, Properties and Utilization. Development in soils science 21. 288 p.

Stockle, C.O., M. Donatelli and R. Nelson 2001. CropSyst, a cropping systems simulation model, Florence, Italy, 289-307.

Temple L., Marie P. 2003. Analyse de la compétitivité et de l'impact économique des filières de production de bananes en Martinique et en Guadeloupe. Rapport MAAPAR 02-B-02-01. 123 p. + annexes.

Tessier D., Berrier J. 1978. Utilisation de la microscopie à balayage dans l'étude des sols. Observations de sols soumis à différents pF. Science du sol, 1, 67-82.

Thies J.E., Grossman J.M. 2006. The soil Habitat and Soil Ecology. In In Biological Approach to Sustainable Soil systems. Norman Uphoff Ed. CRC Press Boca Raton

Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., 2004. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecol. Model.* 180, 407–417.

Turner, D.W. 1995. The response of banana plant to the environment. In: *Bananas and Plantains*. Gowen, S. (Ed), 206-229. Chapman and Hall, London

Treonis, A.M., R. Cook, L. Dawson, S.J. Grayston and T. Mizen 2007. Effects of a plant parasitic nematode (*Heterodera trifolii*) on clover roots and soil microbial communities. *Biology and Fertility of Soils.* 43, 541-548.

Vandermeer J., Van Noordwijk M., Anderson J., Ong C., Perfecto I., 1998. Global change and multispecies agroecosystems : concepts and issues. *Agric. Ecosys. Env.*, 67, 1-22.

Van der Putten W.H et al. 2006. Nematodes interactions in nature: models for sustainable control of nematodes pests of crop plants. *Advances in agronomy*, 89, 227-260.

Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C. 2009. Agroecology as a science, a movement or a practice. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 29, 4, 503-515

Chapitre 5. Sélection de publications

1. No-till banana planting on crop residue mulch: effect on soil quality and crop functioning.
2. Leaf silicon content of banana reveals the weathering stage of volcanic ash soil in Guadeloupe.
3. SIMBA-N: Modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean.
4. Azote minéralisable et statut organique des Andosols de Guadeloupe. Influence du milieu et des pratiques culturelles.
5. Porosity and Soil-Water Properties of Caribbean volcanic ash soil.

No-till banana planting on crop residue mulch: effect on soil quality and crop functioning

Marc DOREL*, Steewy LAKHIA, Chloé PÉTÉTIN, Salah BOUAMER, Jean-Michel RISÈDE

CIRAD-Persyst, UPR 26,
Neufchâteau, 97130
Capesterre Belle-Eau,
Guadeloupe, French West
Indies, France
dorel@cirad.fr

No-till banana planting on crop residue mulch: effect on soil quality and crop functioning.

Abstract -- Introduction. In the French West Indies, farmers generally consider that periodical soil tillage is necessary to increase soil porosity and maintain high yield. However, in the non-tilled perennial banana plantations of the highlands, the soil exhibits better physical and biological properties than in the conventional banana plantations. To determine if tillage before banana planting is necessary for proper banana crop functioning and to assess the effect of tillage on soil quality, banana planting after conventional tillage was compared with no-till banana planting on crop residue mulch on an experimental plot. **Materials and methods.** Soil quality was assessed through indicators such as porosity, organic status, microbial biomass and structure of nematode communities. Crop functioning was assessed through plant growth, root distribution, and soil water and nitrogen availability. **Results.** We found that tillage reduced soil microbial biomass and the number of nematode functional guilds. Tillage had only a short-term effect on soil porosity and did not allow deeper extension of the root system. Although soil organic nitrogen mineralization was higher with conventional tillage, banana nitrogen nutrition was not better, probably because the high nitrogen fertilization offset the variations in availability of nitrogen from organic origin. We found that banana growth was better with no-till treatment. This could be explained by less drying out of soil due to the crop residue mulch left on the soil surface with no-till treatment. **Conclusion.** Relative to conventional tillage, no-till banana planting improved soil quality and crop performance.

France (Guadeloupe) / *Musa* (bananas) / soil biology / zero tillage / mulching / crop performance

Plantation de bananiers sans travail du sol sur un paillis de résidus de culture : effet sur la qualité du sol et le fonctionnement de la culture.

Résumé -- Introduction. Aux Antilles françaises, les planteurs considèrent généralement qu'il est nécessaire d'effectuer périodiquement un travail du sol pour régénérer la porosité du sol et maintenir un fort rendement. Cependant, dans les bananeraies pérennes d'altitude, le sol qui n'est jamais travaillé présente de meilleures propriétés physiques et biologiques que dans bananeraies conduites de manière conventionnelle. Pour déterminer si le travail du sol avant la plantation est nécessaire au bon fonctionnement d'une culture de bananiers et pour évaluer l'effet du labour sur la qualité du sol, une plantation de bananiers après travail du sol classique a été comparée à la plantation directe de bananiers sur un paillis de résidus de récolte en parcelle expérimentale. **Matériel et méthodes.** La qualité du sol a été évaluée par des indicateurs tels que la porosité, le statut organique, la biomasse microbienne et la structure des populations de nématodes. Le fonctionnement de la culture a été évalué par la croissance de la plante, la distribution des racines, et la disponibilité de l'eau et de l'azote du sol. **Résultats.** Nous avons constaté que le travail du sol a réduit la biomasse microbienne du sol et le nombre de guildes fonctionnelles de nématodes. Le travail du sol a eu seulement un effet à court terme sur la porosité du sol et n'a pas permis un enracinement plus profond. Bien que la minéralisation de l'azote organique du sol ait été plus élevée avec le travail du sol conventionnel, la nutrition en azote des bananiers n'a pas été meilleure, probablement parce que la fertilisation azotée élevée a compensé les variations de la disponibilité de l'azote d'origine organique. Nous avons constaté que la croissance des bananiers était meilleure dans le traitement sans travail du sol. Cela a pu être expliqué par un plus faible dessèchement du sol dû au paillis de résidus de récolte laissé sur la surface du sol pour le traitement sans travail du sol. **Conclusion.** Par rapport au travail du sol classique, une plantation sans labour a amélioré la qualité du sol et les performances de la culture.

France (Guadeloupe) / *Musa* (bananes) / biologie du sol / non-travail du sol / paillage / performance de culture

* Correspondence and reprints

Received 12 October 2008
Accepted 3 August 2009

Fruits, 2010, vol. 65, p. 55–68
© 2010 Cirad/EDP Sciences
All rights reserved
DOI: 10.1051/fruits/20010001
www.fruits-journal.org

RESUMEN ESPAÑOL, p. 68

1. Introduction

The detrimental effects of tillage on soil organic carbon stock and erosion risks have been demonstrated in numerous situations for annual crops and have led to the development of alternative techniques in place of conventional tillage [1]. No-tillage and minimum tillage techniques (conservation tillage) have been tested since the 1960s and shown to be efficient for reducing erosion and preserving soil organic carbon [2]. Yet, the effects of these techniques on yield and crop functioning seem to vary according to cultivation conditions [3–5]. With conservation tillage, crop residues left on the soil surface and the resulting higher soil moisture have variable effects on soil pathogens depending on their survival strategies or on establishment of microbial antagonism [6–8]. It is noteworthy that the beneficial effects of conservation tillage, in the short term, are not clearly established for soil quality indicators such as soil porosity [9], structure of nematode communities [10, 11], earthworm abundance and diversity [12], and microbial biomass [13].

In the conventional banana cropping systems of the French West Indies, soil is not tilled annually, but on average every five years when banana plots need to be replanted. Because of the low replanting frequency and the high structural stability of volcanic ash soils, tillage does not induce high erosion risks or markedly decrease soil organic matter content [14, 15]. Farmers generally consider that periodical soil tillage and banana plot replanting are necessary to increase soil porosity and maintain high yield. However, in the non-tilled perennial banana plantations of the uplands, the soil exhibits better physical and biological properties than in the conventional banana plantations [16, 17].

Here we asked the following questions: what are the short-term effects of the absence of tillage on soil quality and crop functioning? Is tillage necessary for the establishment of high yield banana crop? The hypothesis tested was that in banana cropping systems, conservation tillage practices have beneficial effects on soil quality and crop functioning. Banana planting with

no-tillage on crop residue mulch was compared with planting with conventional tillage on an experimental plot. Crop functioning was assessed through plant growth, root distribution, and ability of soil water and nitrogen to meet plant requirements. Soil quality was assessed through the soil profile morphology and through ecologically relevant biological indicators such as microbial biomass and structure of nematode communities. Nematodes were considered because, beyond the fact they are the most abundant metazoan animals of soils and they exhibit an extreme diversity of terrestrial habitats – including the less fertile ones – they are susceptible to disturbances or changes in soils [18, 19]. Being present at various levels of the soil food web, they show a wide species richness that can be related to their critical role in soil system functioning, through their feeding strategies and their life history traits [20, 21]. Nematode faunal analysis thus allows diagnosing the soil food web condition [22–24].

2. Materials and methods

2.1. Experimental site

Our research was conducted on the CIRAD experimental station of Neufchâteau in Guadeloupe (61° W, 16° N; alt. 250 m). Soils are volcanic ash soil classified as Andosol [25]. On the site, mean annual rainfall is 3500 mm and mean daily temperature varies from 21 °C to 25 °C.

The experiment was conducted from February to December 2007 on a 1-ha banana field. Before the experiment began, the field was left under sanitation fallow for one year to lessen the abundance of banana parasitic nematodes. The perennial grass *Brachiaria decumbens* was used as cover crop during the fallow. Soil characteristics were studied at the end of the fallow period (table I).

2.2. Experimental design

Two treatments were applied:

- A no-tillage treatment: Banana plants from tissue culture were planted in March 2007

Table I.
Soil characteristics before treatment application.

Soil depth (cm)	C	N	pH	Ca	Mg	K	Na
	(%)			(mEq·100 g ⁻¹)			
0–10	5.80	0.54	6.67	7.13	3.63	2.65	0.10
10–20	5.26	0.49	6.34	5.92	1.59	1.55	0.05
20–30	5.01	0.46	6.06	3.01	1.67	1.18	0.08

in 10-cm-deep spade holes on the mulch made up of the *Brachiaria decumbens* cover killed by glyphosate application. The mulch left on the soil surface amounted to 18.5 t of dry matter per ha.

– A conventional tillage treatment: Banana plants from tissue culture were planted in March 2007 after glyphosate application on *B. decumbens* and two successive passes of a heavy spading machine (Tortella[®]) in February 2007, which caused *B. decumbens* cover burying. During tillage, soil moisture was 80%, which corresponded to field capacity for this soil [16].

These treatments were randomized in three blocks on 1000-m² elementary plots planted at a density of 1850 plants·ha⁻¹. After planting, fertilizers were applied each month (30 kg N and 60 kg K₂O per ha). Weeds were controlled with herbicide (glyphosate) applied according to weed growth. Weed control required four applications of herbicide in the conventional tillage treatment but only two applications in the no-tillage treatment, due to the effect of the mulch on weed seed germination.

2.3. Soil quality

Soil quality was assessed through the following measurements and observations at banana planting (T₀) and eight months later, at the banana flowering stage (T₀ + 8):

– At banana planting, a 1-m-deep pit was dug in the center of each elementary plot. A 100-cm-wide and 60-cm-high grid with 10-cm-square meshes was vertically applied on the soil profile. After the morphological units of the soil profile were described [26], soil resistance was measured in each mesh

of the grid with a pocket penetrometer (0.78 cm² flat-tipped measuring pin). Three sets of four 100-cm³ cylindrical core samples were taken in the plowed layer (Ap horizon): at the top (Ap₁), in the middle (Ap₂) and at the bottom (Ap₃). These samples were used to determine (i) the soil void ratio considering that soil specific gravity was 2.41 [16], (ii) soil microbial biomass according to the fumigation-extraction method [27], and (iii) organic C and N by automated dry combustion. Saturated soil hydraulic conductivity was determined in three locations in each elementary plot by the double ring method (Müntz infiltrometer).

– Eight months after banana planting, at the banana flowering stage, a 1-m-deep pit was dug in each elementary plot 50 cm from a banana plant. After root location was plotted on the soil profile, three sets of 100-cm³ core samples were taken following the same methods as at banana planting to determine the void ratio, microbial biomass, and organic C and N. In addition, soil nematodes were extracted by elutriation of 250-cm³ soil samples [28]. After nematode identification to genus level, they were assigned to different trophic groups according to Yeates *et al.* [29] and classified along a colonizer-persister gradient (c-p values) following Bongers [30]. They were further allocated into functional guilds by the method of Bongers and Bongers [21]. Finally, according to Ferris *et al.* [22], we evaluated soil food web condition by calculating the following two indices:

- EI (Enrichment Index) = $100 \times [e / (e + b)]$,
- SI (Structure Index) = $100 \times [s / (s + b)]$,
with $e = 0.8 \text{ Fu}_2 + 3.2 \text{ Bac}_1$; $b = 0.8 \text{ Fu}_2 + 0.8 \text{ Bac}_2$; $s = 0.8 (\text{Pr}_2) + 1.8 (\text{Pr}_3 + \text{Fu}_3 +$

$Bac_3) + 3.2 (Om_4 + Pr_4 + Fu_4 + Bac_4) + 5 (Om_5 + Pr_5 + Fu_5 + Bac_5)$, where Fu_i = fungivores, Bac_i = bacterivores, Pr_i = predators, Om_i = omnivores, i varying from 1 to 5 along a colonizer-persister scale.

The enrichment index (EI) reveals the primary enrichment of the soil food web, and consequently the abundance and activity of opportunistic nematodes, which respond rapidly to variation in food resources. It concerns the lower levels of the soil food web, *i.e.*, bacterial and fungal feeders that are primary detritus consumers. The structure index (SI) indicates the soil food web length and stability through the relative abundance of higher nematode trophic levels.

2.4. Crop functioning

2.4.1. Banana growth and development

The following data set was recorded on 20 plants in each elementary plot:

- monthly increase in pseudo-stem girth,
- flowering date of individual banana plant,
- number of fruits per bunch.

2.4.2. Nitrogen availability

Soil mineral nitrogen content was determined colorimetrically after N extraction with a 1 N KCl solution on a composite sample obtained by mixing 30 sub-samples

taken with an auger in the 0-cm to 30-cm layer. Sampling was performed one day before the monthly application of fertilizer in order to minimize the effect of fertilizer application on the measured soil nitrogen content.

Plant nitrogen nutrition was assessed monthly by readings through a chlorophyll-meter (SPAD-Minolta) on the last unfolded leaf of 10 plants in each elementary plot.

2.4.3. Soil water availability

Soil water tension was measured weekly with tensiometers placed at -20 cm and -40 cm underground in each elementary plot.

2.5. Statistical analysis

Variance analysis was carried out to assess the effect of treatments. Stepwise linear multiple regression was used in order to identify the most relevant soil quality indicators to explain crop performance. XLStat software was used for these analyses.

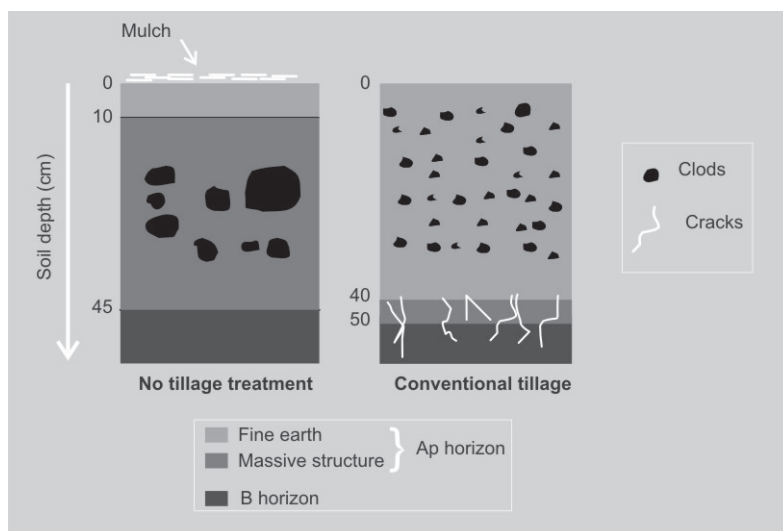
3. Results

3.1. Soil quality

3.1.1. Soil profile description and penetration resistance

Soil profiles observed for no-tillage treatment before banana planting (*figure 1*) showed that, under the mulch, there was a 10-cm layer exhibiting a well-developed structure made of millimetric granular aggregates (fine earth). The color of this layer went from black, in contact with the crop residue litter, to brown at the bottom of the layer (7.5YR 4.3 according to the Munsell color chart). From 10 cm to 45 cm, soil structure became progressively massive but there were some decimetric clods revealing former soil tillage. In this layer, fine tubular pores of biological origin (root paths, etc.) were common. At 45 cm, a clear boundary separated the Ap horizon from the brighter underlying B horizon (7.5YR4.6). The B

Figure 1. Soil profile at the planting time (T_0) of bananas according to treatments with no-tillage and conventional tillage.



horizon presented a massive structure with abundant fine to medium tubular pores.

Soil profiles observed for conventional tillage treatment before banana planting (figure 1) showed that, from 0 cm to 40 cm, the soil exhibited a homogeneous fragmented structure made of small centimetric clods and fine earth resulting from spading. Between 40 cm and 50 cm, the soil presented a massive structure with cracks that seemed to result from spade impacts [31]. Below 50 cm was the brighter B horizon described above.

The variation in soil penetration resistance with depth for no-tillage and conventional tillage treatments showed that the effect of tillage tended to decrease with depth but was still perceptible between 40 cm and 60 cm (figure 2), thus below layers moved by the spading machine. This observation could result from soil cracking below the impact point of the spades.

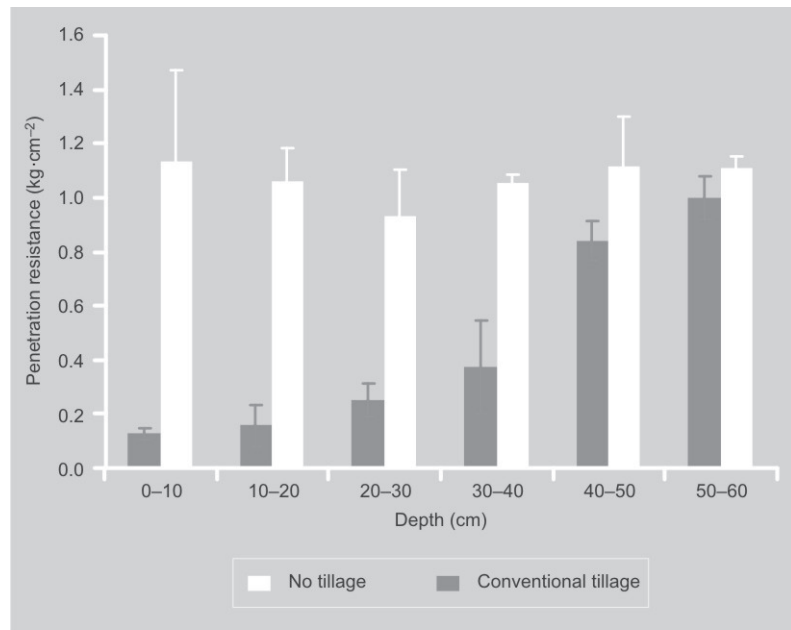
3.1.2. Soil organic matter

Although organic carbon and nitrogen content at banana planting (T_0) tended to be higher in the upper level of the Ap horizon of no-tillage treatment (figure 3), variance analysis did not show a significant effect of tillage or depth on these variables ($P > 0.05$).

3.1.3. Soil biological properties

3.1.3.1. Microbial biomass

Regarding soil microbial carbon content at the top, in the middle, and at the bottom of the Ap horizon at banana planting (T_0) and at the flowering stage ($T_0 + 8$), variance analysis showed a significant effect of the interaction of tillage, soil depth and date of sampling ($**P < 0.01$) (figure 4). At T_0 , the highest microbial biomass was with no-tillage treatment at the top of the Ap horizon. With no-tillage, the microbial biomass decreased with depth while, with conventional tillage, microbial biomass did not differ at the three levels of the cultivated layer. At the $T_0 + 8$ stage, microbial biomass strongly decreased with both treatments. However, microbial biomass was still significantly higher and decreasing with depth for



no-tillage, and it was lower and constant whatever the depth for conventional tillage treatment.

3.1.3.2. Nematode functional guild and food web condition

The number of functional guilds (nFG) varied significantly with tillage ($*P < 0.05$) and soil depth ($***P < 0.001$). In the upper (Ap1) and middle (Ap2) levels of the Ap horizon, nFG was higher for no-tillage treatment than for conventional tillage treatment (Ap1: nFG = 14 for no-tillage and nFG = 9 for conventional tillage; Ap2: nFG = 11 for no-tillage and nFG = 8 for conventional tillage) mainly because of the lower number of predator and omnivore guilds (figure 5). At the bottom of the Ap horizon (Ap3), predator and omnivore guilds completely disappeared with both treatments (figure 5). In this layer, the bacterivore 1 guild corresponding to enrichment opportunistic nematodes was present in the no-tillage treatment but was absent in the conventional tillage treatment.

The planar representation of the soil food web conditions based on the structure index (SI) and the enrichment index (EI) indices shows that tillage had a significant effect on EI ($***P < 0.001$) but not on SI,

Figure 2.

Variation with depth of penetration resistance of soil in banana plantation according to treatments with no-tillage and conventional tillage.

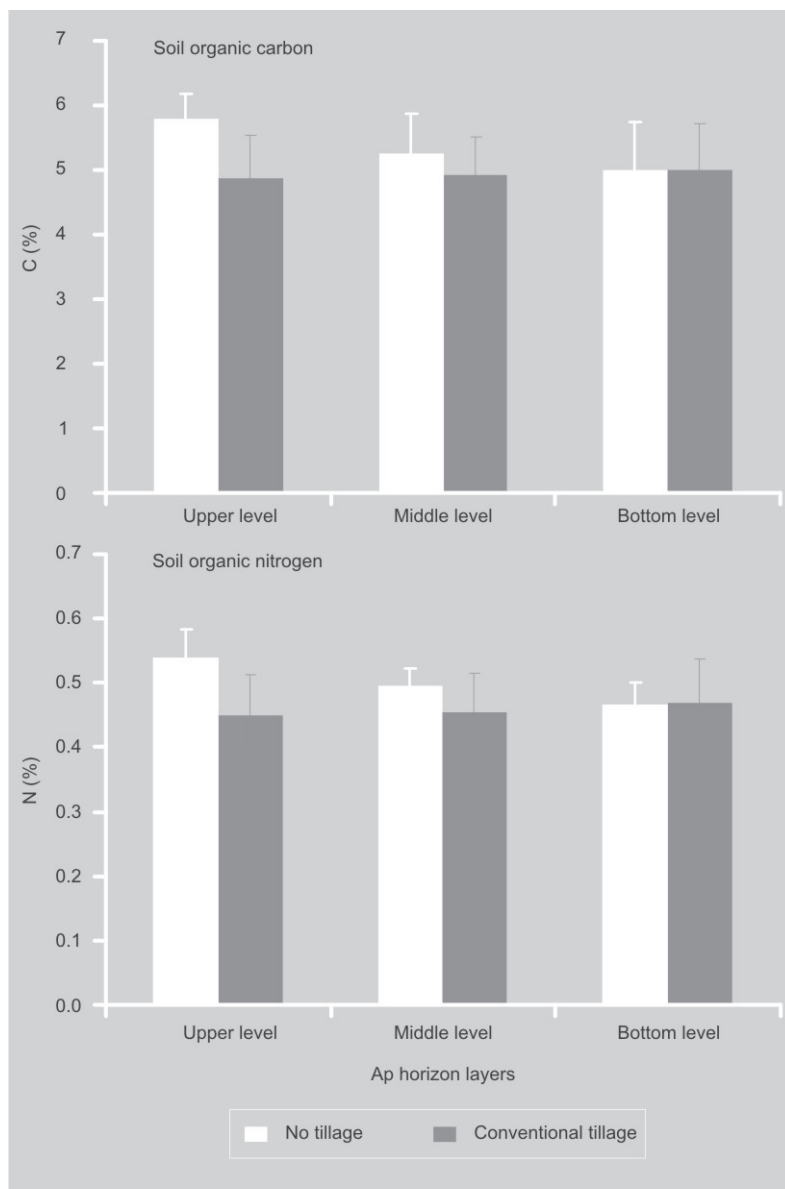


Figure 3. Soil organic carbon and soil organic nitrogen in banana plantation at the banana planting time (T_0) according to treatments with no-tillage and conventional tillage.

while depth had a significant effect on EI ($***P < 0.001$) and SI ($***P < 0.001$) (figure 6). At a given depth, EI was systematically higher with no-tillage treatment. In the upper (Ap1) and the middle (Ap2) levels of the Ap horizon, SI and EI were high with both treatments. According to Ferris *et al.* [22], high SI and EI indicate matured food web conditions with low disturbance, N enrichment and a balanced decomposition channel (fungi/bacteria). At the bottom

layer of the Ap horizon (Ap3), EI was high with no-tillage treatment but decreased markedly with conventional tillage treatment. This low EI in the Ap3 layer with conventional tillage treatment can be explained by the absence of bacterivore 1 guild nematodes (figure 5). In Ap3, SI values were markedly lower than in Ap1 and Ap2 with both tillage treatments. These low SI values reveal the absence of the upper level of the soil food web in this layer with no-tillage and conventional tillage treatments (figure 5).

3.1.4. Porosity and hydraulic conductivity

Variance analysis on data regarding the soil void ratio at banana planting (T_0) and at the flowering stage ($T_0 + 8$) in the upper (Ap1), middle (Ap2) and bottom (Ap3) layers of the Ap horizon revealed a significant effect of the interaction of tillage, depth and date of sampling ($***P < 0.001$) (table II). At T_0 , void ratios were significantly higher with conventional tillage treatment than with no-tillage treatment. Between the T_0 and $T_0 + 8$ stages, the Ap1 void ratio decreased markedly with conventional tillage treatment; in contrast, the Ap1 void ratio tended to increase slightly with no-tillage treatment. At $T_0 + 8$, the Ap1 void ratio became lower with conventional tillage treatment than with no-tillage treatment. Note that, with conventional tillage treatment, the decrease in void ratio between the T_0 and $T_0 + 8$ stages was lesser in Ap2 and Ap3 than in Ap1.

At the T_0 stage, the hydraulic conductivity of the conventional tillage soil was significantly higher than that of no-tillage soil (table III). However, the average hydraulic conductivity in no-tillage soil was near $20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$, which is sufficient for infiltration of most of the rainfall events in the Neufchateau site [32]. Between the T_0 and $T_0 + 8$ stages, the hydraulic conductivity of the conventional tillage soil decreased markedly; at the $T_0 + 8$ stage, the two treatments did not differ significantly. In fact, the soil hydraulic conductivity variation appears coherent with the void ratio variation in the superficial layer.

3.2. Crop functioning

3.2.1. Banana growth and crop productivity

According to our results, banana growth, assessed by pseudo-stem girth increase, was better with no-tillage treatment (*figure 7*). Hence, with no-tillage treatment, pseudo-stem girth at the flowering stage was significantly higher (*table IV*). Average fruit number per bunch was higher and average flowering date was earlier in no-tillage treatment but the differences with conventional tillage treatment were not significant.

3.2.2. Soil water tension

Soil water tension increased with conventional tillage during the dry period occurring between weeks 16 and 28 after planting, reaching values over 500 mbars (*figure 8*). The same trend was observed with no-tillage but water tension values were lower. The differences between no-tillage and conventional tillage were more pronounced at -20 cm than at -40 cm.

3.2.3. Soil nitrogen availability

Soil mineral nitrogen increased after planting with both tillage treatments. The increase was stronger for conventional tillage and resulted mainly from nitrate production (*figure 9*). Five months after planting, soil mineral nitrogen fell to low values with both treatments. With conventional tillage treatment, tillage disrupted aggregates and increased soil organic matter accessibility to microbes. Moreover, tillage improved soil aeration. Consequently, tilled soil conditions were more favorable to organic N mineralization than no-tilled soil [9, 33].

Banana nitrogen nutrition was assessed through banana leaf chlorophyll content (*figure 10*). Chlorophyll-meter readings were very close for the conventional tillage and no-tillage treatments, indicating that nitrogen nutrition levels were similar. It seems that higher soil nitrogen availability with conventional tillage treatment did not improve banana nitrogen nutrition.

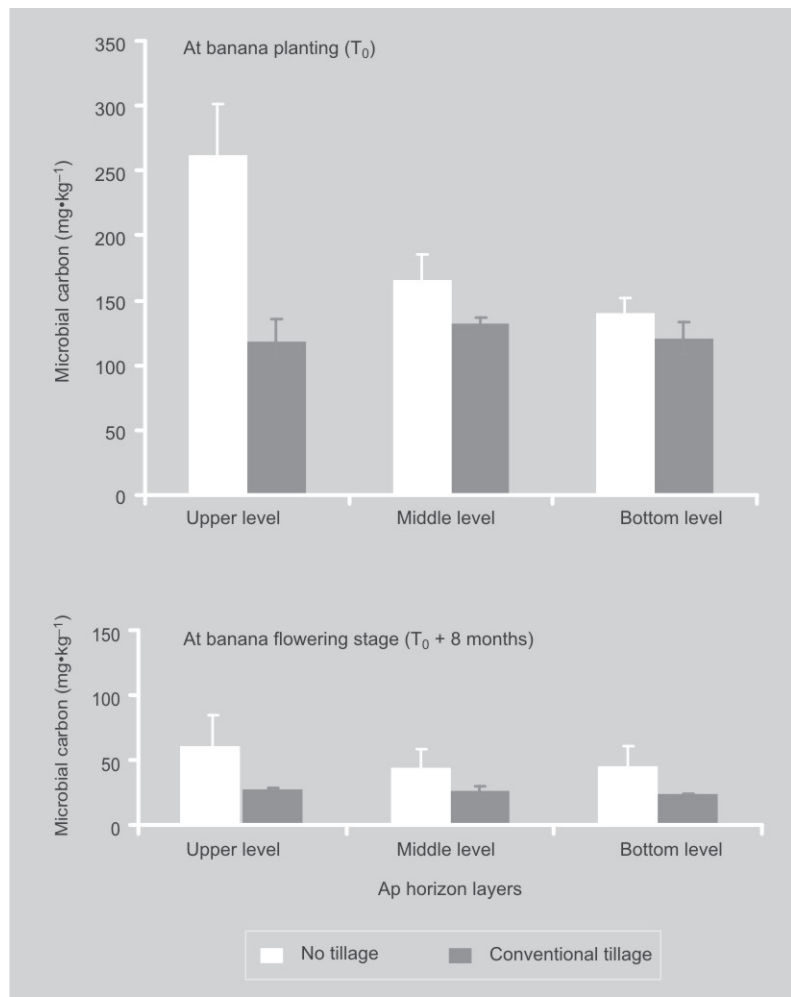


Figure 4.

Comparison between soil microbial carbon with no-tillage and conventional tillage treatments at planting time (T_0) and at the flowering time eight months after T_0 ($T_0 + 8$).

3.2.4. Root distribution

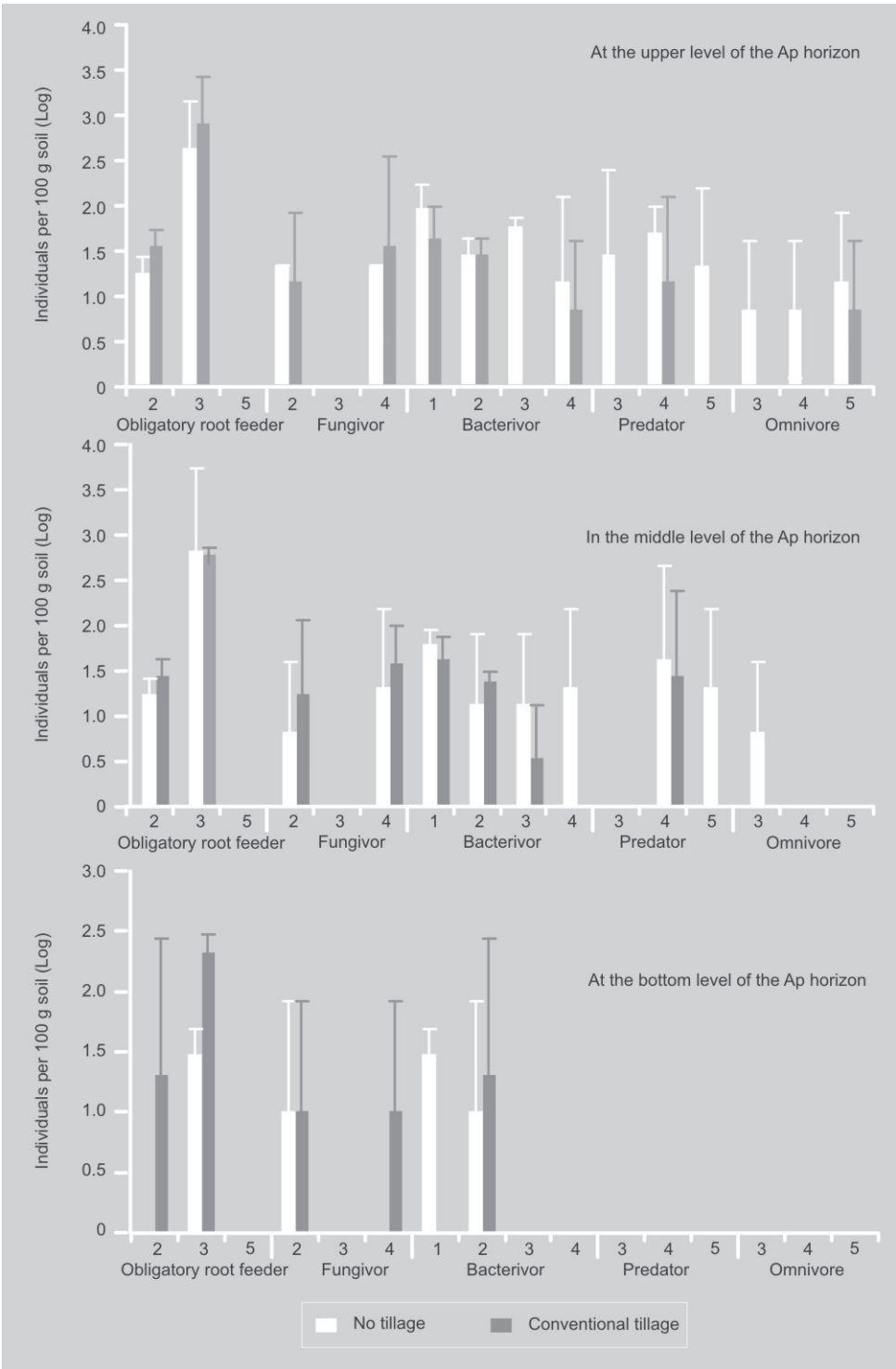
Although root density in the 10-cm to 30-cm layer tended to be higher with conventional tillage and maximum root depth tended to be higher with no-tillage, the root distribution in soil profiles did not differ markedly between no-tillage and conventional tillage treatments (*figure 11*).

It must be noted that necrosis caused by soilborne pathogens was not observed on the roots in no-tillage treatment as in conventional tillage treatment.

3.2.5. Crop performance and soil quality

The pseudo-stem girth (PG) of banana at the flowering stage was chosen as an indicator

Figure 5. Abundance of nematodes in each functional guild (after Log transformation) at the upper (Ap1), in the middle (Ap2) and at the bottom (Ap3) levels of the Ap horizon layers for no-tillage and conventional tillage treatments (for obligatory root feeders, fungivores, bacterivores, predators and omnivores; the indices 1 to 5 correspond to a colonizer-persister scale).



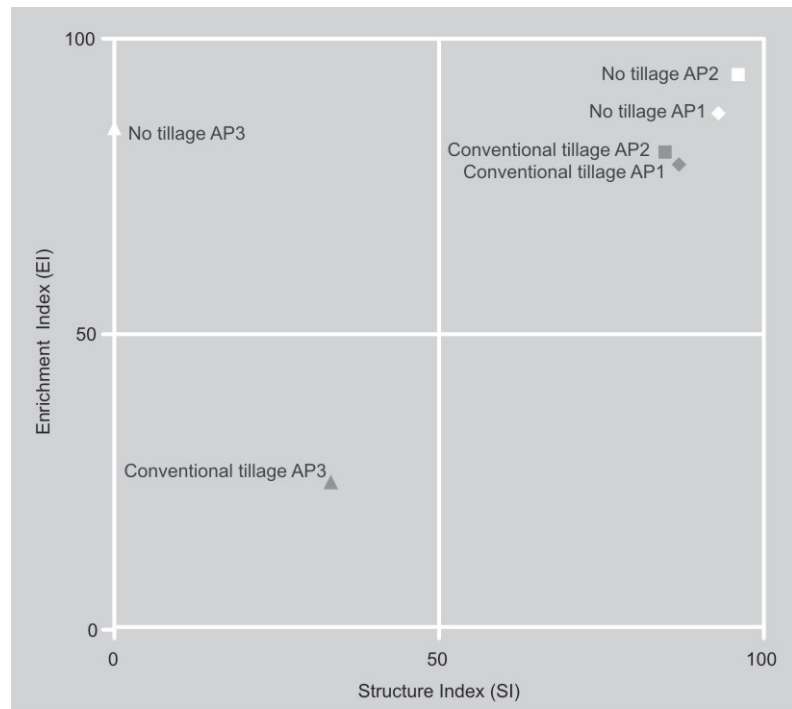
of crop performance. A stepwise linear multiple regression analysis was carried out to assess the influence of indicators of soil quality [porosity, hydraulic conductivity, penetration resistance, microbial biomass, nitrogen and carbon content, pH, nematode food web indices (enrichment index, structure index), and functional guild number] on PG measured in the six elementary plots of our experiment.

The best linear model for PG prediction was obtained by combining the microbial biomass of the 0–10-cm layer (MB_{0-10}) and nematode food web structure index (SI) as follows: $PG = 29.32 + 0.29 SI + 0.0581 MB_{0-10}$ ($R^2 = 0.969$).

4. Discussion

4.1. Effect of tillage on soil quality

Our results showed that soil porosity and soil hydraulic conductivity increased markedly immediately after tillage because of fragmentation of the massive structure. This effect disappeared 8 months after plantation. Soil structure degradation under conventional banana cropping was reported by Dorel [34] and explained by mechanical constraints applied on the wet bare soil when workers circulate in the banana field. At plantation, porosity was lower in no-till soil but tended to be slightly higher 8 months after. This tendency was probably due to high biological activity under crop residue mulch. Thus, tillage improves soil



structure only in the short term, whereas no-till seems to favor the development of biological porosity.

Between one and five months after plantation, we observed higher mineral nitrogen production with conventional tillage treatment. Tillage favors soil organic matter mineralization mainly because it disrupts aggregates and exposes protected organic matter to biodegradation [33]. This organic resource degradation due to tillage could explain why, 8 months after tillage, enrichment

Figure 6.

Structure index (SI) and enrichment index (EI) indices at the upper (Ap₁), in the middle (Ap₂) and at the bottom (Ap₃) levels of the Ap horizon layers for no-tillage and conventional tillage treatments.

Table II.

Void ratio in the plowed layer: at the top (Ap₁), in the middle (Ap₂) and at the bottom (Ap₃), for conventional tillage and no-tillage treatments at banana planting (T₀) and eight months later, at the banana flowering stage (T₀+8).

Plowed layer	Void ratio at T ₀		Void ratio at T ₀ + 8	
	No-tillage	Conventional tillage	No-tillage	Conventional tillage
At the top	2.54 cd	3.30 a	2.80 bc	2.41 d
In the middle	2.48 cd	3.32 a	2.49 cd	2.72 bcd
At the bottom	2.71 bcd	3.03 b	2.52 cd	2.70 bcd

Letters indicate groups significantly different according to the Newman-Keuls test.

Table III.

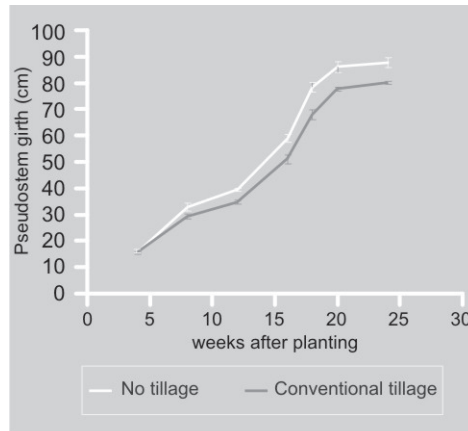
Soil hydraulic conductivity with no-tillage and conventional tillage treatments ($n = 3$).

Hydraulic conductivity at T_0 (mm·h ⁻¹)		Hydraulic conductivity at T_0+8 (mm·h ⁻¹)	
No-tillage	Conventional tillage	No-tillage	Conventional tillage
18 b	1852 a	44 b	69 b

Letters indicate groups significantly different according to the Newman-Keuls test.

Figure 7.

Girth increase in banana pseudo-stem according to treatments with no-tillage and conventional tillage ($n = 3$).



index values were the lowest with conventional tillage treatment. The enrichment index is related to resource availability [22] and in particular to the amount of organic nitrogen able to be degraded and mineralized by soil organisms [35, 36]. Enrichment index values were particularly low at the bottom (Ap3) of the tilled layer with conventional tillage treatment because tillage has probably drastically favored the access of organic matter to soil organisms in the deep layer of conventional tillage treat-

ment, thus leaving a lesser residual resource availability in Ap3-conventional tillage than in Ap3-no-tillage.

Our experiment showed that tillage affected the size and distribution of the microbial biomass in the soil profile. However, tillage had no significant effect on soil organic matter content. In our experiment, no-tillage and conventional tillage treatments did not differ in long-term soil management; they differed only in mode of soil preparation before present crop establishment. Our results agree with those of Chausod *et al.*, reporting that soil organic matter content depended on long-term cumulated effects of crop management, whereas microbial biomass could change rapidly with recent modification of cultural practices [37].

In the surface layers, we found that tillage reduced nematode functional guild number and particularly affected the upper level of the soil food web (predators, omnivores). However, this reduction was low and had only a slight effect on the structure index which characterizes food web length. In a review concerning the effect of tillage effect on nematode communities, Okada and Harada noticed that many studies have found no effects of no-tillage on nematode communities, while others showed significant effects [10]. According to those authors, the absence of effect was observed in experiments in which no-tillage treatment was short (< 1 year). We compared here no-tillage and conventional tillage in an 8-month period, which could explain the weak effect we observed on nematode communities. However, in the case of banana crop, tillage is performed at most every 4 years and the cumulative effect of tillage in a long period could be lesser than with annual crops

Table IV.

Banana productivity indicators for no-tillage and conventional tillage treatments ($n = 3$).

Treatment	Flowering date (weeks after planting)	Pseudo-stem girth at flowering stage (cm)	Fruit number per bunch
No-tillage	38.6	61	194.2
Conventional tillage	39.5	57	175.9
Significance	Non-significant ($P = 0.12$)	Significant** ($P < 0.01$)	Non-significant ($P = 0.07$)

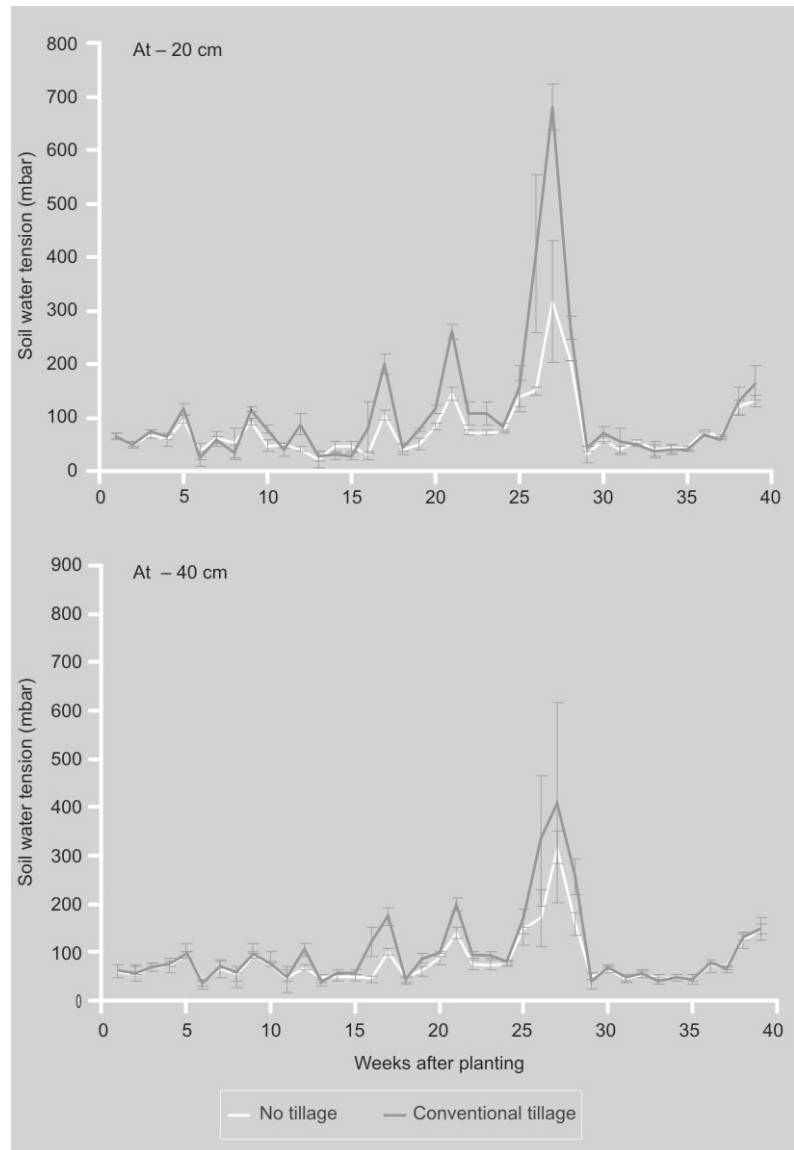
because nematode communities may recover between two successive disturbances by soil tillage.

4.2. Effect of tillage on crop functioning

The higher soil nitrogen availability with conventional tillage treatment did not result in better banana nitrogen nutrition, as assessed through chlorophyll-meter readings. The high level of nitrogen fertilization applied in banana crop ($350 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{year}^{-1}$) likely met the banana requirements largely and offset the effects of the lower nitrogen availability with no-tillage treatment.

The lower soil water tension with no-tillage treatment seems to result from the mulch effect which protects the soil surface from direct evaporation. High soil water tension during the driest period probably led to banana water stress, particularly with conventional tillage treatment. Dorel and Ozier-Lafontaine observed a progressive reduction of banana growth when soil water tension increased over 100 mbar [38]. A better water availability could contribute to explaining the better banana growth in no-tillage treatment. After analyzing numerous tillage experiments, Germon *et al.* [4] and Franzluebbers [5] reported that the beneficial effects of conservation tillage on plant growth are generally explained by a higher water availability related to the reduction of soil evaporation.

Although soil root growth conditions (porosity, penetration resistance, hydraulic conductivity) seemed better after tillage, colonization of the soil profile was not improved compared with no-tilled soil. Lecompte *et al.* reported that the reduction of air-filled porosity due to soil compaction affected banana root extension [39]. In no-tillage treatment, biological porosity generated during the fallow period under *Brachiaria decumbens* cover seemed sufficient for the banana root system to be properly established and soil loosening in conventional tillage treatment did not improve root growth conditions.



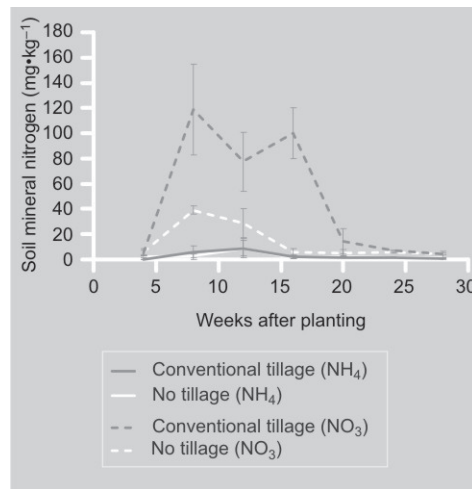
We found that banana pseudo-stem girth at the flowering stage could be predicted from indicators of biological soil quality such as microbial biomass and the food web structure index. These indicators were more relevant to explain crop performance than indicators of soil physical properties such as porosity, hydraulic conductivity or penetration resistance. These results suggest that the preservation of soil biological properties is more useful for banana crop performance than soil loosening by tillage.

Figure 8.

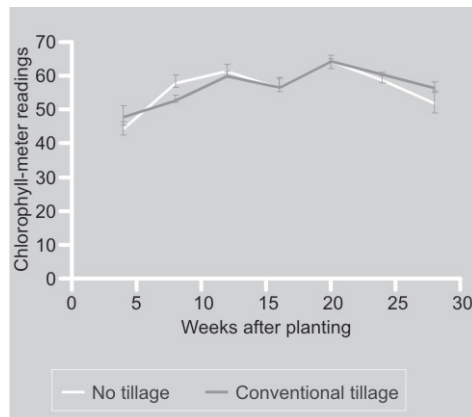
Weekly variations in soil water tension in banana plantation at -20 cm and -40 cm according to treatments with no-tillage and conventional tillage ($n = 3$).

Figure 9.

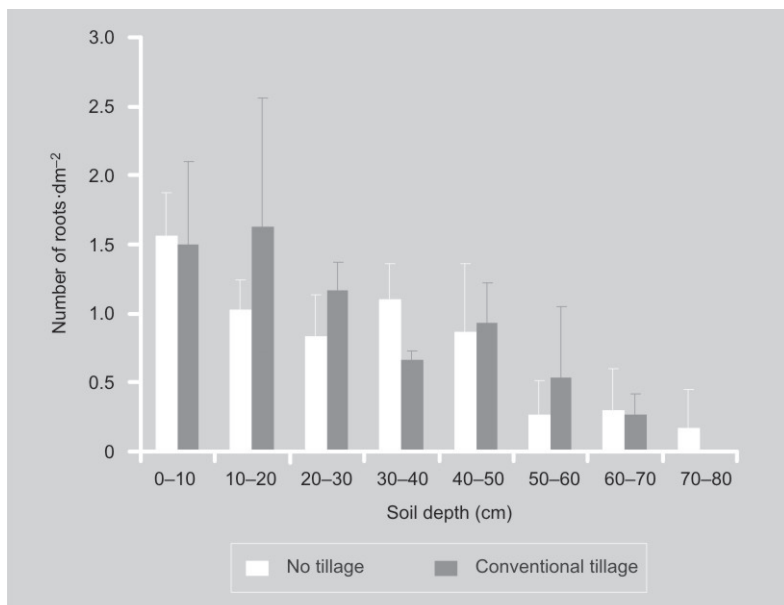
Soil mineral nitrogen dynamics (NO_3^- and NH_4^+) in banana plantation according to treatments with no-tillage and conventional tillage ($n = 3$).

**Figure 10.**

Chlorophyll-meter readings in banana plantation according to treatments with no-tillage and conventional tillage ($n = 3$).

**Figure 11.**

Root density distribution in the soil profile eight months after banana planting ($T_0 + 8$) according to treatments with no-tillage and conventional tillage ($n = 3$).



5. Conclusions

Conventional banana planting after tillage (conventional tillage) allowed short-term increase in porosity and hydraulic conductivity and decrease in penetration resistance of the soil but it did not improve root extension in the soil profile compared with no-till banana planting on crop residue mulch (no-tillage). No-tillage improved soil biological properties (larger microbial biomass and greater functional richness of nematofauna), had less drying out of soil and led to better crop performance. Although differences between no-tillage and conventional tillage should decrease in the longer term because of the low frequency of tillage in the banana cropping system, no-till banana planting on crop residue mulch can be advised for banana growers.

Acknowledgements

This work was partly supported by an ENDURE (European Network for Durable Exploitation of Crop Protection Strategies) grant.

References

- [1] Lal. R., Reicosky D.C., Hanson J.D., Evolution of the plow over 10 000 years and the rationale for no-till farming, *Soil Tillage Res.* 93 (2007) 1–12.
- [2] Lal R., Griffin M., Apt J., Lave L, Morgan M.G., Managing Soil Carbon, *Science* 304 (5669) (2004) 393.
- [3] Caneil J., Bodet J.M., Simplification du travail du sol et rendement des cultures, *Colloq. INRA* 65 (1991) 63–82.
- [4] Germon J.C., Taureau J.C., Thomas J.M., Effets des méthodes simplifiées de travail du sol sur les transformations de l'azote et leurs conséquences sur le lessivage des nitrates, *Colloq. INRA* 65 (1991) 125–154.
- [5] Franzluebbers A.J., Tillage and residue management effect on soil organic matter. Effect of tillage on plant growth, in: Magdoff F., Ray R.W. (Eds.), *Soil organic matter in sustainable agriculture*, CRC Press, Boca Raton, USA, 2004.

- [6] Bockus W.W., Shroyer J.P., The impact of reduced tillage on soilborne plant pathogen, *Annu. Rev. Phytopathol.* 36 (1998) 485–500.
- [7] Govaerts B., Fuentes M., Mezzalama M., Nicol J.M., Deckers J., Etchevers J.D., Figueroa-Sandoval B., Sayre K.D., Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements, *Soil Tillage Res.* 94 (2007) 209–219.
- [8] Sturz A.V., Carter M.R., Johnston H.W., A review of plant disease, pathogen interaction and microbial antagonism under conservation tillage in temperate humid agriculture, *Soil Tillage Res.* 41(1997) 169–189.
- [9] Peigné J., Ball B.C., Roger-Estrade J., Davis C., Is conservation tillage suitable for organic farming? A review, *Soil Use Manag.* 23 (2007) 129–144.
- [10] Okada H., Harada H., Effects of tillage and fertilizer on nematode communities in a Japanese soybean field, *Appl. Soil Ecol.* (2007) 35 582–598.
- [11] Brmez M., Ivezić M., Raspudic E., Effect of mechanical disturbance on nematode communities in arable land, *Helminthologia* 43 (2) (2006) 117–121.
- [12] Chan K.Y., An overview of some tillage impacts on earthworm population abundance and diversity – implications for functioning in soils, *Soil Tillage Res.* 57 (2001) 179–191.
- [13] Alvarez C.R., Alvarez R., Short-term effects of tillage system on active soil microbial biomass, *Biol. Fertil. Soil* 31 (2000) 157–161.
- [14] Khamsouk B., Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de cultures bananiers sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique de Martinique, ENSA Montp., Thesis, Montp., France, 2001, 214 p.
- [15] Dorel M., Lombard K., Oliver R., Azote minéralisable et statut organique des andosols de Guadeloupe. Influence du milieu et des pratiques culturales, *Etude Gest. Sols* 12 (2005) 267–280.
- [16] Dorel M., Roger-Estrade J., Manichon H., Delvaux B., Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils, *Soil Use Manag.* 16 (2000) 133–140.
- [17] Clermont-Dauphin C., Cabidoche Y.-M., Meynard J.-M., Effects of intensive monocropping of bananas on properties of volcanic soils in the uplands of the French West Indies, *Soil Use Manag.* 20 (2004) 105–113.
- [18] Virginia R.A., Wall D.H., How soil structure communities in the Antarctic Dry Valleys, *Bio-science* 49 (1999) 973–983.
- [19] Gupta V.V.S.R., Yeates G.W., Soil microfauna as bioindicators of soil health, in: Pankhurst C.E., Doube B.M., Gupta V.V.S.R., *Biological indicators of soil health*, CABI Publ., Wallingford, U.K., 1997.
- [20] Mulder C., Schouten A.J., Hund-rinke K., Breure A.M., The use of nematodes in ecological soil classification and assessments concepts, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 62 (2005) 278–289.
- [21] Bongers T., Bongers M., Functional diversity of nematodes, *Appl. Soil Ecol.* 10 (1998) 239–251.
- [22] Ferris H., Bongers T., de Goede R.G.M., A framework for soil food web diagnostics: extension of the nematode faunal analysis concept, *Appl. Soil Ecol.* 18 (2001) 13–29.
- [23] Neher D., Role of nematodes in soil health and their use as indicators, *J. Nematol.* 33 (4) (2001) 161–168.
- [24] Yeates G.W., Bongers T., Nematode diversity in agroecosystems, *Agric. Agrosyst.d Environ.* 74 (1999) 113–135.
- [25] Anon., World reference base for soil resources: keys to reference soil groups of the World, in: ISSS Work. Group Ref. Base, *World Soil Resour. Rep. no. 84*, FAO, Rome, Italy, 1998.
- [26] Anon., Guidelines for soil description, 4th ed., FAO, Roma, Italy, 2006.
- [27] Amato M., Ladd J.N., Essay for microbial biomass based on ninhydrin-reactive nitrogen in extracts of fumigated soils, *Soil Biol. Biochem.* 200 (1988) 107–114.
- [28] Seinhorst J. W., Modifications of the elutriation method for extracting nematodes from soil, *Nematologica* 8 (1962) 117–128.
- [29] Yeates G., Bongers T., de Goede R.G.M., Freckman D.W., Georgieva S.S., Feedings habits in nematode families and genera – an outline for soil ecologists, *J. Nematol.* 25 (1993) 315–331.
- [30] Bongers T., The maturity index: an ecological measure of environmental disturbance based on nematodes species composition, *Oecologia* 83 (1990) 14–19.

- [31] Barthelemy P., Boigontier D., Lajoux P., Machines à bêcher, in: Choisir les outils de travail du sol, ITCF, Paris, France, 1987.
- [32] Cattan P., Cabidoche Y.-M., Lacas J.-G., Voltz M., Effects of tillage and mulching on runoff under banana (*Musa spp.*) on a tropical andosol, *Soil Tillage Res.* 86 (2006) 38–51.
- [33] Balesdent J., Chenu C., Balabane M., Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage, *Soil Tillage Res.* 53 (2000) 215–230.
- [34] Dorel M., Problèmes de préparation des sols en bananeraie. Cas des sols à halloysite, *Fruits* 46 (4) (1991) 419–427.
- [35] Ferris H., Venette R.C., van der Meulen H.R., Scow K.M., Nematode faunal indicators of soil food web condition, *J. Nematol.* 30 (1998) 495–496.
- [36] Ferris H., Matute M., Structural and functional succession in the nematode fauna of a soil food web, *Appl. Soil Ecol.* 23 (2003) 93–110.
- [37] Chaussod R., Zuvia M., Breuil M.C., Hétier J.M., Biomasse microbienne et statut organique des sols tropicaux : exemple d'un sol vénézuélien des Llanos sous différents systèmes de culture, *Cah. Orstom (Série Pédol.)* 27 (1992) 59–67.
- [38] Dorel M., Ozier-Lafontaine H., Pilotage de l'irrigation des bananeraies sur sols ferrallitiques et sols vertiques en Guadeloupe : recherche d'indicateurs de l'état hydrique de la culture, *Fruits* 53 (1998) 17–26.
- [39] Lecompte F., Ozier-Lafontaine H., Pagès L., An analysis of growth rates and directions of growth of primary roots of field-grown banana trees in an andisol at three levels of soil compaction, *Agron.* 23 (2003) 209–218.

Plantación de bananos sin trabajo del suelo sobre un rastrojo de residuos de cultivo: efecto sobre la calidad del suelo y sobre el funcionamiento del cultivo.

Resumen -- Introducción. En las Antillas francesas los plantadores consideran generalmente que es necesario efectuar periódicamente un trabajo del suelo para regenerar su porosidad y mantener así un fuerte rendimiento. Sin embargo en las plantaciones bananeras perennes de altitud, el suelo que jamás está trabajado, presenta mejores propiedades físicas y biológicas que en las plantaciones bananeras tratadas de modo convencional. Con el fin de determinar si el trabajo del suelo antes de la plantación es necesario para el buen funcionamiento de un cultivo de bananos ; así como para evaluar el efecto de la labor sobre la calidad del suelo, se comparó una plantación de bananos tras trabajar el suelo de modo clásico con la plantación directa de bananos sobre un rastrojo de residuos de cosecha, en parcela experimental. **Material y métodos.** La calidad del suelo se evaluó mediante indicadores como, por ejemplo, la porosidad, el estatus orgánico, la biomasa microbiana y la estructura de las poblaciones de nematodos. Se evaluó el funcionamiento del cultivo gracias al crecimiento de la planta, a la distribución de las raíces, así como a la disponibilidad del agua y del nitrógeno del suelo. **Resultados.** Constatamos que el trabajo del suelo redujo la biomasa microbiana del mismo así como el número de conjunto de especies funcionales de nematodos. El trabajo del suelo únicamente tuvo un efecto a corto plazo sobre la porosidad del suelo; y, no permitió un arraigamiento más profundo. A pesar de que la mineralización del nitrógeno orgánico del suelo fuese más elevada en el suelo trabajado convencionalmente, la nutrición de los bananos, en nitrógeno, no fue mejor; probablemente porque la elevada fertilización nitrogenada compensó las variaciones de la disponibilidad orgánica de nitrógeno en el suelo. Constatamos que el crecimiento de los bananos era mejor en el tratamiento sin suelo trabajado. Esto puede explicarse por una desecación del suelo causado por dejar sobre la superficie del suelo el rastrojo de residuos de cosecha, en el tratamiento sin suelo trabajado. **Conclusión.** En relación con el clásico suelo trabajado, una plantación sin labor mejoró la calidad del suelo así como los rendimientos del cultivo.

Francia (Guadalup) / *Musa* (bananes) / cultivo / biología del suelo / Cero-labranza / desempeño de cultivos

Leaf silicon content in banana (*Musa* spp.) reveals the weathering stage of volcanic ash soils in Guadeloupe

C. Henriët · L. Bodarwé · M. Dorel · X. Draye ·
B. Delvaux

Received: 3 March 2008 / Accepted: 4 June 2008
© Springer Science + Business Media B.V. 2008

Abstract Several plant species accumulate silicon, which is taken up by roots in soil solution. The Si concentration in soil solution can be governed by silicate dissolution and formation, and thus soil constitution. Here, we study the Si leaf content of mature banana plants (*Musa acuminata* cv Grande Naine) cropped on soils derived from andesitic ash in Guadeloupe through standard foliar analysis. The soils strongly differ in weathering stage and total Si content. The most desilicated soils (Andosol–Nitisol–Ferralsol) occur in the wettest areas, on the Eastern slopes (Es) of the volcano exposed to rain bearing winds. Least weathered soils (Andosol–Cambisol)

occur on Western slopes (Ws). The average leaf Si concentration ranges from 2.7 to 3.9 g kg⁻¹ for bananas cropped in Es soils, and from 7.7 to 9.6 g kg⁻¹ in Ws soils. The leaf Si concentrations are lowest for the Es gibbsite-rich Andosols and Ferralsols. The leaf Si concentration is positively correlated with soil CaCl₂-extractable Si content, soil Si content and total reserve in weatherable minerals. The silicon content of banana leaves thus reveals the weathering stage of volcanic ash soils in Guadeloupe.

Keywords Silicon · *Musa* · Foliar diagnosis · Soil weathering · Transpiration

Responsible Editor: Jian Feng Ma.

C. Henriët · L. Bodarwé · B. Delvaux (✉)
Soil Science Unit, Université Catholique de Louvain,
Place Croix du Sud 2/10,
1348 Louvain-la-Neuve, Belgium
e-mail: bruno.delvaux@uclouvain.be

M. Dorel
Département des productions fruitières et horticoles,
Centre de coopération internationale en recherche
agronomique pour le développement (CIRAD),
Station de Neufchâteau,
Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe

X. Draye
Crop Physiology and Plant Breeding Unit,
Université Catholique de Louvain,
Place Croix du Sud 2/11,
1348 Louvain-la-Neuve, Belgium

Introduction

Silicon plays a crucial role in global biogeochemical processes such as the regulation of carbon dioxide (Berner 1995; Kump et al. 2000), the buffering of proton fluxes through silicate dissolution (Rai and Kittrick 1989), and the nutrition of both marine and terrestrial biota (Smetacek 1999). Since the rates of mineral dissolution can be enhanced by plant impact on silicate weathering (Moulton et al. 2000), plants can exert a strong imprint on the Si continental cycle, and thereby on Si release to water streams (Derry et al. 2005). Several plant species readily accumulate silicon, which is, however, not considered as an essential plant nutrient (Epstein 1994). Si-accumulators are mostly monocots (Ma and Takahashi 2002).

Silicon is taken up by plant roots in the form of water-soluble H_4SiO_4 and follows the water flow from roots to transpiration sites (Raven 2001) through passive and active transport (Ma et al. 2006). Therein, silica precipitates within particles of biogenic opal ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), called phytoliths (Smithson 1956). In controlled conditions, the supply of H_4SiO_4 in the nutrient solution governs the content of Si in plant tissue (Van der Vorm 1980; Henriot et al. 2006).

Silicon soil-to-plant transfer could thus be influenced by the availability of aqueous H_4SiO_4 in soil, and by the plant transpiration rate. The concentration of H_4SiO_4 in soil solution may range between 0.01 and 1.99 mM (Karathanasis 2002). It varies depending on Si plant uptake, adsorption onto Fe- and Al-oxides, silicate weathering and dissolution, and silicate formation (Sommer et al. 2006). The mineralogical constitution of soils may thus control the concentration levels of H_4SiO_4 in the soil solution (Kittrick 1969; Karathanasis 2002). In humid tropical regions, desilication is a major trait of weathering (Chadwick et al. 2003). In these areas, weathering sequences of soils developed on volcanic ash are remarkably suited to study the impact of soil weathering stage on soil constitution and properties (Parfitt et al. 1983; Delvaux et al. 1989; Chadwick et al. 2003), on plant nutrient status (Delvaux et al. 1989; Chadwick et al. 1999), and likely on plant Si concentration (Fox et al. 1967).

Silicon accumulation by young banana plantlets (*Musa acuminata* cv Grande Naine) in hydroponics is controlled by the concentration of Si in the nutrient solution (Henriot et al. 2006). Here, we assess the silicon status of mature banana plants cropped on soils developed on andesitic ash, but differing in their weathering stage and mineralogical constitution (Colmet-Daage and Gautheyrou 1974; Ndayiragije 1996; Ndayiragije and Delvaux 2004). We further evaluate the availability of Si for plants in these soils, and infer its dependence on soil constitution and weathering stage.

Environmental framework

In the island of Basse-Terre, Guadeloupe (16° N, 61° W), Caribbean area, volcanic ash soils cover extensive areas on the surrounding slopes of the active volcano La Soufrière (1,467 m asl), and of eroded ancient volcanoes active during Tertiary times (Colmet-Daage and Lagache 1965). The ash deposits of Quaternary

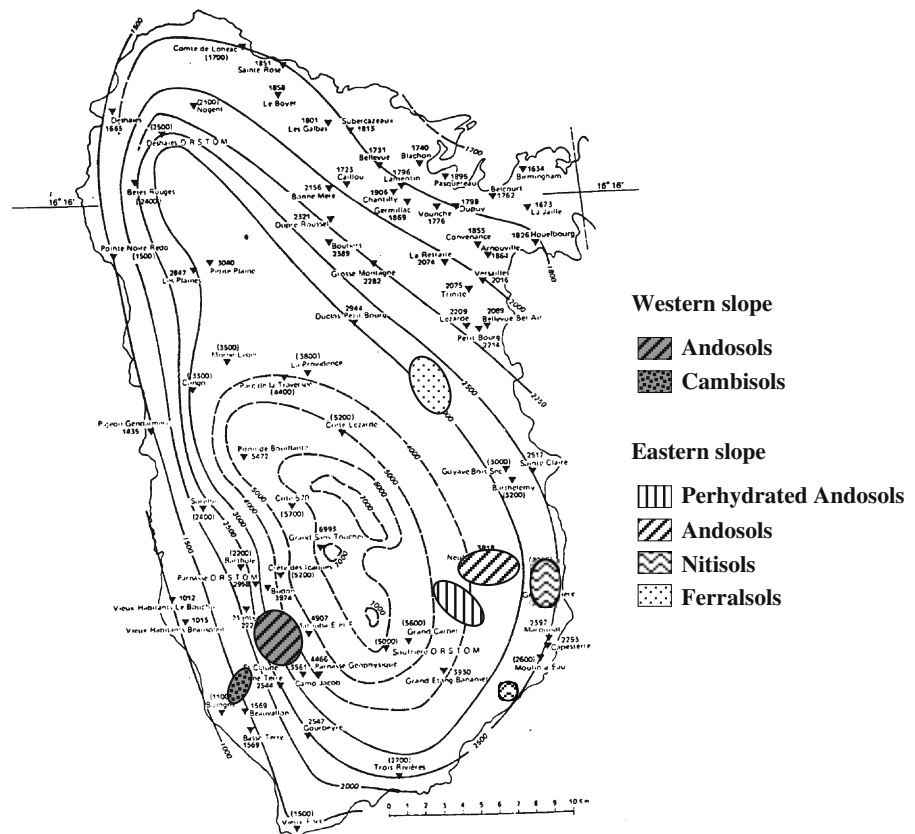
and Pliocene times are of andesitic composition; plagioclase, pyroxene and ferromagnesian volcanic glasses are the dominant weatherable minerals (Dagain et al. 1981; Ndayiragije 1996). The ashy materials readily weathered under humid tropical conditions. On the Western slopes (Ws) of the volcano, the Ws soil pattern involves an Andosol–Cambisol–Vertisol toposequence from 500 m asl to sea level, corresponding to mean annual rainfall (MAR) decreasing from ~3,500 to ~1,000 mm (Fig. 1), and to the mineralogical sequence ash → allophane → halloysite/smectite → smectite (Colmet-Daage and Lagache 1965; Pineros Garcet 1994). The Eastern slopes (Es) of the volcano are exposed to rain-bearing winds from the Atlantic Ocean: MAR exceeds 5,000 mm at 500 m asl, and decreases to 2,500 mm downslope at sea level (Fig. 1). The Es soil pattern involves an Andosol–Nitisol–Ferralsol weathering sequence, corresponding to the mineralogical sequence ash → gibbsite, allophane → halloysite, Fe-oxide → kaolinite, Fe-oxide, gibbsite (Colmet-Daage and Lagache 1965; Ndayiragije 1996; Ndayiragije and Delvaux 2003, 2004). Ws Andosols and Cambisols as well as Es Andosols, Nitisols and Ferralsols have long been extensively used for intensive banana cropping (Colmet-Daage and Lagache 1965; Ndayiragije 1996; Dorel et al. 2000). The soils are thus fertilized, notably by K, Ca, and Mg supplies.

Materials and methods

Experimental sites and general sampling scheme

Six experimental sites were selected on the basis of the detailed 1:20,000 soil map of Guadeloupe (Colmet-Daage 1969; Fig. 1). Their main characteristics are presented in Table 1. Two sites corresponded to the Ws Andosols (Ws-An) and Cambisols (Ws-Ca), and four sites to the Es perhydrated Andosols (Es-An1), Andosols (An2), Nitisols (Es-Ni), and Ferralsols (Es-Fe). The Ferralsols (Es-Fe) developed from Tertiary pyroclasts deposited during Pliocen (Dagain et al. 1981). The other soils developed from Quaternary ash deposits (4,000–140,000 years BP) (Colmet-Daage and Gautheyrou 1974; Dagain et al. 1981). They are members of chronotoposequences characterized by decreasing elevation and decreasing MAR in the order Ws-An–Ws-Ca on western slopes, and Es-An1–Es-An2–Es-Ni on eastern slopes (Fig. 1).

Fig. 1 Mean annual rainfall (mm) map of the island Basse-Terre (Guadeloupe) (Chaperon et al. 1985). Circles indicate the localization of the experimental sites on each major soil type: Andosol, Cambisol, Nitisol, Ferralsol, of the Western and the Eastern slopes of the volcano La Soufrière



In each experimental site, we selected ten cultivated banana plots. The cultivar was *Musa acuminata* cv Grande Naine (group AAA, Cavendish, dessert banana). In each plot, we selected ten plants of similar crop yield potential, i.e. homogeneous pseudostem circumference (~65–70 cm as measured for each plant

at 1 m from soil surface), at flowering. For each plant, we sampled the external part of the lamina at the centre (100 mm width) of the antepenultimate leaf (leaf III), following the international standard set up for banana foliar diagnosis (Martin-Prével 1980). The ten foliar samples were mixed up as a composite leaf sample for

Table 1 Some characteristics of the six experimental sites corresponding to the Western (Ws) and Eastern (Es) slopes of the volcano La Soufrière

Symbol	Soil type (WRB: ISSS 1998)	Locality	Elevation ^a (m asl)	Rainfall ^b (mm)	Clay minerals ^c
Ws-An	Humic Andosol	Grand-Val	471	3,448	Allophane
Ws-Ca	Haplic Cambisol	Belle-View	202	1,808	Halloysite, smectite
Es-An1	Molli-silicic Andosol	Féfé	412	4,697	Gibbsite, allophane, kaolinite, hydroxy-Al interlayered 2:1 minerals
Es-An2	Humic Andosol	Neufchâteau	226	3,645	Allophane, gibbsite, hydroxy-Al interlayered 2:1 minerals
Es-Ni	Haplic Nitisol	Changy	35	2,566	Halloysite, Fe oxide
Es-Fe	Haplic Ferralsol	Féneteau	162	3,284	Kaolinite, Fe oxide, gibbsite

^a Average value of the sampling area

^b Mean annual rainfall (Chaperon et al. 1985)

^c Colmet-Daage and Lagache (1965); Colmet-Daage and Gautheyrou (1974); Pineros Garcet (1994); Ndayiragije (1996); Ndayiragije and Delvaux (2003, 2004)

each plot. We sampled the soil at 50 cm distance from the base of each of the ten banana plants selected for foliar sampling, by using a small auger calibrated at 00–20 cm depth. For each plot, the ten soil samples were mixed up as a composite bulk sample. The comprehensive sampling scheme thus involved 600 individual leaf and soil samples, leading to 60 composite plant and soil samples for further analyses.

The topsoil-foliar sampling was carried out between February and March 2006, after the period of plant growth during the rainy season (April to January). The coordinates and altitude levels were recorded at each plot with a global positioning system (Garmin®). The altitude levels were used to compute the mean annual rainfall (MAR) values for each plot according to the linear regressions established by Chaperon et al. (1985) for both the Western (Ws) and Eastern (Es) slopes of the volcano:

$$\text{Ws : } \text{MAR(mm)} = 577 + 6.10 \times (\text{Elevation(m)})$$

$$r^2 = 0.97$$

$$\text{Es : } \text{MAR(mm)} = 2,368 + 5.65 \times (\text{Elevation(m)})$$

$$r^2 = 0.94$$

Plant material and analysis

The 60 composite leaf samples were stored at 60°C for 1 week for dry weight determination. Mineral analysis was carried out after calcination at 450°C for 1 day and fusion in Li-metaborate + Li-tetraborate at 1,000°C (Chao and Sanzalone 1992), followed by ash dissolution with concentrated HNO₃. Nutrient and Si concentrations were measured by inductively coupled plasma-atomic emission spectrometry (ICP-AES).

Since the Si concentration shows a strong gradient between young and old leaves (Henriet et al. 2006), the foliar concentration of Si was also measured from leaf I to the oldest leaf. For this purpose, we selected a representative banana plot for each site, where soil conditions were close to the central concept of each site-specific soil. In each of these plots, we selected one banana plant among the ten selected for foliar diagnosis. The chosen plant had a pseudostem circumference closest to the average value at the plot

level. For each plant, we sampled banana leaves from leaf I to the oldest leaf. All the procedure was then similar to the one described here above up to the determination of leaf Si concentration.

Soil material and analysis

The 60 bulk soil samples were moderately air-dried (12 h at room temperature, 20°C), sieved at 2 mm, and stored for further analyses. Sub-samples were dried at 105°C until constant weight to determine soil dry weight.

The CaCl₂-extractable Si content was determined in each bulk sample using 0.01 M CaCl₂ (adapted from Haysom and Chapman 1975). The extraction procedure was standardized as follows: a 5-g (equivalent dry weight) soil sample was placed into a 100 ml polyethylene cup with 50 ml extractant (soil/solution ratio 1:10) and shaken for 5 h at 20°C. The suspensions were then centrifuged at 3,400×g for 10 min, and the supernatants were filtered through Whatman no. 4 paper. The concentration of Si in the supernatant was determined by ICP-AES. The measurement of soil CaCl₂-extractable Si content was done twice. Soil pH was measured in H₂O in 5 g:25 ml suspensions. Cation exchange capacity (CEC) and the content of exchangeable cations were determined according to Jackson (1965). Elemental analysis was carried out for the 60 soil samples after calcination at 1,000°C and Li-metaborate + Li-tetraborate fusion (Chao and Sanzalone 1992). Briefly, a crushed sample of 100 mg was melted at 1,000°C for 5 min in a graphite crucible in the presence of 0.4 g Li-tetraborate and 1.6 g Li-metaborate. The cooled melt was then dissolved in 100 ml of 2 M HNO₃ under magnetic agitation at 100°C. The contents of elements (Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Ti, and Mn) were determined by ICP-AES spectrometry. The total contents of alkaline and alkaline-earth cations were summed up as the total reserve in bases (TRB), which estimates the content of weatherable minerals in mineral soil horizons (Herbillon 1986).

Results

Soil properties

As illustrated in Table 2, the average pH values in each experimental site ranged between 5.1 and 6.0,

denoting regular liming under intensive banana cropping (Ndayiragije 1996; Ndayiragije and Delvaux 2004). The average value of CEC significantly decreased from 57 to 22 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in the order Es-An1 > Es-An2 > Ws-An > Es-Ni > Ws-Ca = Es-Fe. The average contents of exchangeable Ca, Mg and K are relatively large, denoting the regular liming and fertilization practices in intensive banana cropping systems. The exchangeable Mg content was, however, significantly larger in Ws- than in Es-soils. The average value of ECEC decreased from 14.1 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in Ws-Ca to 7.8 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in Es-Fe. The exchange complex was desaturated in all soils except in the Cambisols Ws-Ca, where the average base saturation amounted to 63%.

The CaCl_2 -extractable Si content in soils (mg kg^{-1}) varied from 8 in Es-An2 to 69 in Ws-Ca (data not shown). As shown in Table 2, the average CaCl_2 -extractable Si content in soils significantly decreased from 54.3 to 18.7 mg kg^{-1} in the sequence Ws-Ca > Ws-An = Es-Ni > Es-Fe = Es-An1 = Es-An2, the largest values being measured in Ws-soils.

The TRB values decreased from 341 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in Ws-Ca (Cambisol) to 21 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in Es-Fe (Ferralsol) (data not shown). The total Si content in soils decreased from 269 g kg^{-1} in Ws-Ca (Cambisol) to 144 g kg^{-1} in the Es Andosols Es-An1 (data not shown). The average values of TRB and soil elemental contents in each experimental site are presented in Table 3. The average total Mg, Ca, K and Na contents were larger in Ws than in most Es soils. The total reserve in bases (TRB) sums up the elemental

contents of alkaline and alkaline-earth cations, including the cations occluded in minerals as well as those located on ion exchange sites. In this respect, TRB estimates the content of weatherable minerals in mineral soil horizons (Herbillon 1986). The average TRB significantly decreased from 270 to 26 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ in the order Ws-Ca > Ws-An > Es-An1 > Es-An2 = Es-Ni > Es-Fe. Ca and Mg were the major cations in the TRB, but their proportion largely decreased in the strongly weathered Andosols, Nitisols and Ferralsols from the Eastern slopes (Es-An2, Es-Ni, Es-Fe). The average total Si content was significantly larger in Ws (241–262 g kg^{-1}) than in Es soils (158–193 g kg^{-1}). The lowest average Si contents (159–158 g kg^{-1}) occurred in the Andosols Es-An1 and Es-An2. The largest average Al, Fe, and Ti contents occurred in Es soils (104–137 g kg^{-1} for Al, 85–111 g kg^{-1} for Fe, and 6.6–9.4 g kg^{-1} for Ti), and the lowest in Ws soils (~90 for Al, ~70 g kg^{-1} for Fe, and ~5.3 g kg^{-1} for Ti). The average Mn content was larger in Es-Ni (3.1 g kg^{-1}) and Es-Fe (3.4 g kg^{-1}) than in any other soils.

Leaf Si and nutrient concentrations

The Si concentration in banana leaf samples (g kg^{-1} DM) varied from 1.7 in the Ferralsol Es-Fe to 12.0 in the Cambisol Ws-Ca (data not shown). As shown in Table 4, the average leaf Si concentrations per experimental site ranged between 2.73 to 9.64 g kg^{-1} DM, respectively in Es-Fe (Ferralsol) and Ws-Ca (Cambisol) samples. The average leaf Si concentrations were

Table 2 Average values of CaCl_2 -extractable Si content, pH, exchangeable bases levels, cation exchange capacity (CEC) and effective CEC, as measured in the fine earth (<2 mm) of soil samples from the six experimental sites (ten plots per site)

Soil	pH (H_2O)	Exchangeable bases/ $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$				ECEC/ $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	CEC/ $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	BS/%	CaCl_2 extractable Si/ mg kg^{-1}
		Ca	Mg	Na	K				
Ws-An	5.4±0.1	7.6±0.5	3.0±0.2	0.12±0.0	2.3±0.2	13.0±0.7	35±1.0	38±2.0	36.1±1.7
Ws-Ca	6.0±0.1	8.5±0.5	3.3±0.2	0.13±0.0	2.2±0.1	14.1±0.8	22±0.6	63±2.8	54.3±3.2
Es-An1	5.3±0.1	6.8±1.1	1.8±0.3	0.14±0.0	1.1±0.2	9.9±1.4	57±0.8	17±2.5	19.5±1.4
Es-An2	5.8±0.2	6.9±1.0	1.8±0.2	0.10±0.0	1.8±0.2	10.5±1.0	45±1.8	24±3.3	18.7±2.0
Es-Ni	5.5±0.2	6.5±1.0	1.8±0.2	0.14±0.0	1.8±0.2	10.2±1.1	30±1.2	34±3.6	34.4±2.8
Es-Fe	5.1±0.1	4.3±0.3	1.6±0.1	0.10±0.0	1.8±0.1	7.8±0.6	25±0.8	31±2.0	21.1±3.5
LSD ^a	0.6	3.0	0.8	0.03	0.7	3.7	4	10	9.7

Values are the mean ± SE (standard error) ($n=10$)

ECEC Effective cation exchange capacity (sum of exchangeable cations), CEC cation exchange capacity, BS base saturation (ECEC/CEC×100)

^aLeast significant difference (LSD) is given for each characteristic ($\alpha=0.01$)

Table 3 Average contents of elements, and total reserve in Ca, Mg, Na, K (TRB) in the fine earth (<2 mm) of soil samples from the six experimental sites (ten plots per site)

Soil	Total element content/g kg ⁻¹										TRB ^a /cmol _c kg ⁻¹
	Si	Al	Fe	Ca	Mg	Na	K	Mn	P	Ti	
Ws-An	241±3.4	90±2.1	70±2.3	13.7±0.9	9.9±0.4	6.5±0.5	5.1±0.3	1.6±0.1	2.2±0.2	5.3±0.3	191±9.9
Ws-Ca	262±1.7	89±1.4	73±1.5	24.2±1.2	11.2±0.8	10.4±0.2	4.7±0.2	1.4±0.0	1.0±0.1	5.4±0.1	270±11.9
Es-An1	159±3.4	104±1.7	85±1.6	5.7±0.7	10.6±1.1	1.6±0.2	3.3±0.5	1.6±0.3	2.0±0.1	6.6±0.2	131±13.2
Es-An2	158±4.1	137±2.9	100±2.5	4.4±1.1	6.3±0.6	1.2±0.1	2.6±0.1	2.4±0.2	1.9±0.1	7.4±0.3	86±6.6
Es-Ni	193±4.1	135±3.1	104±1.7	3.9±0.6	4.4±0.5	1.5±0.3	3.0±0.2	3.1±0.2	1.6±0.1	8.8±0.4	70±8.5
Es-Fe	180±4.6	136±2.9	111±2.1	1.4±0.1	1.4±0.0	0.3±0.0	2.6±0.2	3.4±0.7	1.2±0.1	9.4±0.1	26±1.2
LSD ^b 14	14	9	7	3.2	2.5	1.0	1.1	1.3	0.5	0.9	36

Values are the mean ± SE (standard error) ($n=10$)

^a TRB (total reserve in bases) is the sum (cmol_c kg⁻¹) of total contents of Ca, Mg, K, Na (Herbillon 1986)

^b Least significant difference (LSD) is given for each element ($\alpha=0.01$)

significantly smaller in the Es (2.73–3.91 g kg⁻¹) than in the Ws sites (7.66–9.64 g kg⁻¹). The significantly highest Si concentration was measured in the Cambisol Ws-Ca. Within the Eastern transect, the average leaf Si concentrations did not significantly differ between soils. The plant nutrient concentrations revealed adequate plant nutrition with respect to Ca, Mg, K, P and Mn (Table 4). The average leaf concentrations of Mn were significantly larger in Es-Ni and Es-Fe than in other soils, likely because of the large contents of Mn oxide in these strongly weathered soils (Ndayiragije 1996).

Figure 2 shows the Si concentration in each leaf as a function of leaf age from the sampling of one plant per representative plot per site. For each leaf age, Si concentration was larger for Ws soils than for Es soils. The Si concentration was strongly correlated to the leaf age in all soils ($r=0.88, 0.93, 0.92, 0.81$, and

0.96, for Es-An1, Es-An2, Es-Ni, Ws-An, and Ws-Ca, respectively), except in Es-Fe ($r=0.08$). Figure 2 also shows that the accumulation rate of Si in banana leaves was much larger in plants cropped on Ws soils than on Es soils.

Discussion

Soil weathering stage and chemical properties

The data presented in Table 3 show that the volcanic ash soils under study differ in weathering stage, in good agreement with previous studies (Colmet-Daage and Lagache 1965; Colmet-Daage and Gautheyrou 1974; Ndayiragije 1996; Ndayiragije and Delvaux 2003, 2004). These studies converge to show that weathering stage was directly related to the annual

Table 4 Average values of the Si and nutrient concentrations (g kg⁻¹ DM) in banana leaf samples (external part of the lamina of leaf III) in the six experimental sites (ten plots per site)

Soil	Total elemental concentration/g kg ⁻¹ DM						
	Ca	Fe	K	Mg	Mn	P	Si
Ws-An	4.86±0.26	0.07±0.00	31.83±0.62	3.25±0.04	0.37±0.05	2.00±0.03	7.66±0.75
Ws-Ca	4.87±0.15	0.05±0.00	33.29±0.44	3.20±0.07	0.44±0.02	2.21±0.06	9.64±0.68
Es-An1	4.14±0.32	0.07±0.00	29.46±0.65	2.90±0.06	0.40±0.07	2.07±0.05	3.35±0.30
Es-An2	4.58±0.40	0.06±0.00	32.34±0.70	3.19±0.16	0.48±0.06	2.13±0.04	2.75±0.20
Es-Ni	5.49±0.23	0.05±0.00	29.02±0.51	3.07±0.07	1.30±0.24	1.83±0.04	3.91±0.42
Es-Fe	6.57±0.22	0.09±0.00	28.31±0.56	3.23±0.05	1.50±0.11	2.02±0.03	2.73±0.20
LSD ^a	1.04	0.01	2.22	0.33	0.44	0.16	1.82

Values are the mean ± SE (standard error) ($n=10$)

^a Least significant difference (LSD) is given for each element ($\alpha=0.01$)

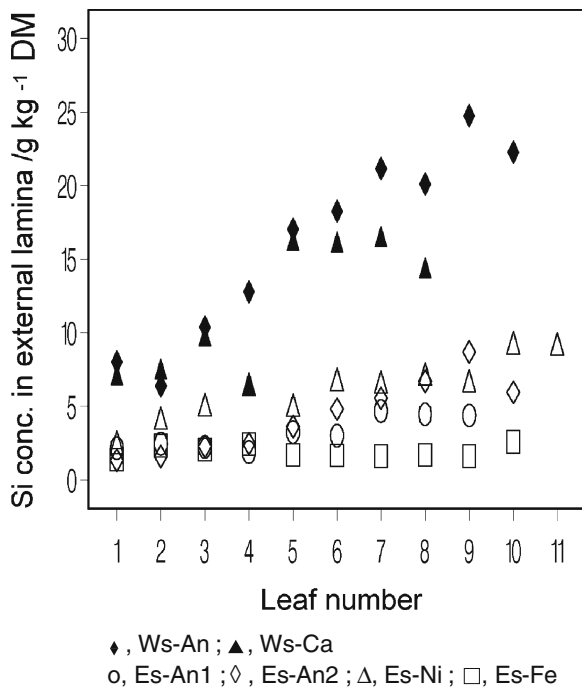


Fig. 2 Relationship between the leaf Si concentration in banana (external part of the lamina) and the leaf position related to the sequence of leaf emergence (each point of the graph corresponds to one leaf sample)

precipitation and age of parent material. Since weathering depletes primary minerals, elements are lost to leaching. Figure 3 shows that the loss of Si and TRB (Ca, Mg, K, Na) parallels a relative concentration of Al and Fe, confirming previous data obtained in various tropical volcanic environments (Delvaux et al. 1989; Nieuwenhuysen et al. 1994; Chadwick et al. 2003; Delfosse et al. 2005). In our soils developed on similar andesitic ash, the concomitant decrease of the total Si content and TRB ($r=0.74$) reveals the advanced weathering stage of the Es soils relatively to Ws (Table 3, Fig. 3). The loss of Si and base cations (TRB) results in a relative accumulation of Al and Fe ($r=-0.87$ and $r=-0.86$, respectively). It also induces a relative accumulation of titanium (Fig. 4), a poorly mobile element in soils: Ti content is negatively correlated with Si content ($r=-0.55$) and TRB ($r=-0.83$). Table 3, Figs. 3 and 4 all illustrate that Es-soils are more weathered than Ws-soils. The lowest TRB values (21–32 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) measured in Es-Fe are typical for strongly weathered ferrallitic soils (Herbillon 1986). Rainfall and the amount of water available to leach elements from soil are major

features determining weathering, soil constitution and exchange properties (Chadwick et al. 2003). Figure 5a illustrates the negative impact of the amount of annual precipitation on Si content of soils ($r=-0.69$). Yet, Ws-An and Ws-Ca do not follow the general trend observed for Es-soils, as they exhibit larger soil Si contents than Es-soils at given MAR value. These features are caused by less advanced weathering (see TRB in Table 3; Fig. 4) and the nature of dominant secondary clay minerals denoting the presence of smectite in Ws-Ca (Table 1), the stability of which is linked to relatively high concentration of aqueous H_4SiO_4 (Karathanasis 2002). In Es-soils, intense weathering and leaching led to stronger mineral depletion and desilication (Table 3, Figs. 4 and 5), and to the synthesis of secondary oxides and 1:1 clay minerals typical for such conditions (Table 1). Noteworthy is the fact that gibbsite is a dominant secondary constituent in the Es-Andosols (Table 1; Ndayiragije and Delvaux 2003). The linear decline of base saturation with respect to MAR ($r=-0.74$; Fig. 5b) further illustrates the depletion of exchangeable cations in strong leaching conditions, despite of regular fertilization as practiced in intensive banana cropping systems.

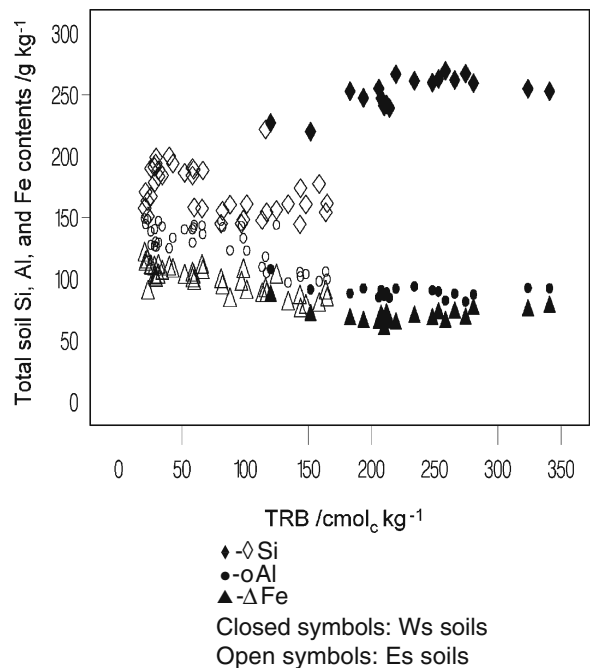
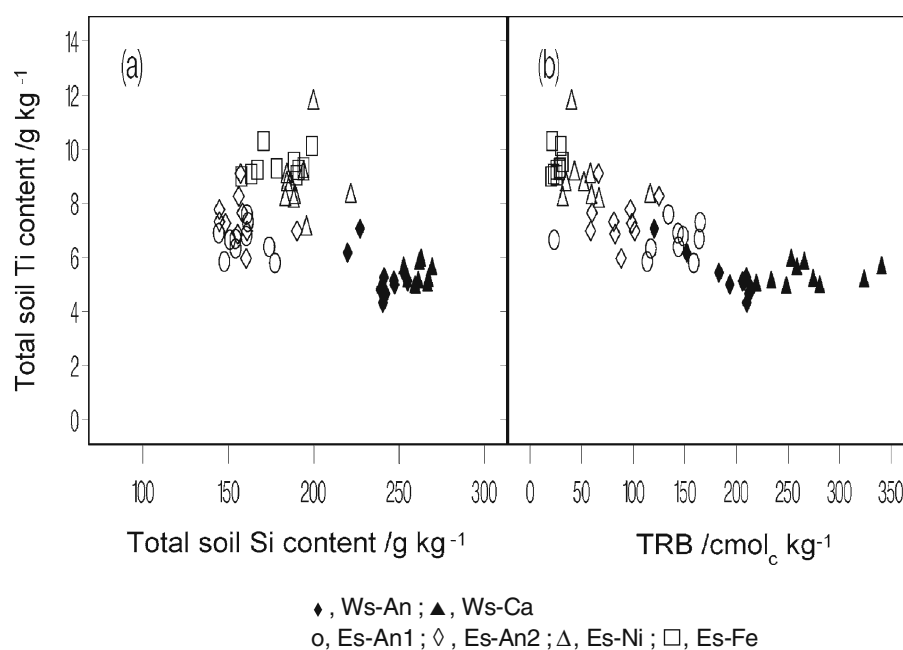


Fig. 3 Relationship between total Si, Al, Fe contents and total reserve in bases (TRB) in the 60 soil samples from the six experimental sites. Ws Western slopes, Es Eastern slopes

Fig. 4 Relationship between soil Ti content and: **a** total Si content, **b** total reserve in bases (TRB) in the 60 soil samples from the six experimental sites. *Ws* Western slopes, *Es* Eastern slopes



Leaf silicon concentration of banana plant reveals the weathering stage of soils

To the best of our knowledge, we report here the first values of leaf concentrations of silicon in mature banana plants, purposely sampled at flowering stage for foliar diagnosis using international standards (Martin-Prével 1980). The banana plant is a silicon-accumulator (Henriet et al. 2006). The average leaf Si concentrations (Table 4: 2.73–9.64 g kg⁻¹) are within the range of leaf Si concentrations measured in young banana plantlets (0–14 g kg⁻¹) cultivated in hydroponics (Henriet et al. 2006). The average leaf Si concentrations in mature banana plants are below the leaf Si concentrations of other Si-accumulators such as rice (*Oryza sativa*) (63 g kg⁻¹ DM) and wheat (*Triticum aestivum* L.) (14.4 g kg⁻¹ DM) (Ma and Takahashi 2002, and references therein). They are, however, similar to those measured in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) (7.7 g kg⁻¹ DM), another well-known Si accumulator (Ma and Takahashi 2002).

The leaf Si concentration in banana is strongly correlated with soil CaCl₂-extractable Si content ($r=0.85$), total Si content ($r=0.85$), and TRB ($r=0.82$) (Fig. 6). The CaCl₂-extractable Si content is directly related to the concentration of Si in soil solution, and thus provides a convenient test to predict the availability of soil Si for plants, as shown for different plant species

cropped in other soil types (Haysom and Chapman 1975; Chapman et al. 1981; Berthelsen et al. 2001). Figure 6a supports this assessment. In hydroponics, Si status of young banana plantlets is controlled by the concentration of Si in the nutrient solution (Henriet et al. 2006). The present data corroborate this conclusion for mature banana plants sampled in cultivated plots, since the CaCl₂ extractant is recognised to provide a measure of readily available Si (Chapman et al. 1981). Figure 6 further shows that the bioavailability of silicon, as measured by the leaf Si concentration of mature banana plants, strongly differs between Ws and Es-soils, and is directly related to silicate reserve and soil weathering stage. The leaf Si concentration as well as the CaCl₂-extractable Si content, soil Si content and TRB all decrease in the sequence Ws-Ca > Ws-An > Es-Ni > Es-Fe = Es-An2 = Es-An1. The bioavailability of silicon is the lowest in the Es gibbsitic perhydrated Andosols and in the Ferralsols, where it is linked to Si depletion (Fig. 6), and to the relative accumulation of secondary oxides and Si-poor aluminosilicates (Fig. 3, Table 1). Our experimental data thus suggest that Si concentration in the soil solution may control the uptake of silicon by banana plants and thus impact the leaf Si concentration. In turn, the concentration of aqueous Si in soil is controlled by soil mineral constitution (Kittrick 1969; Karathanasis 2002). The dissolution of weatherable minerals is probably a major

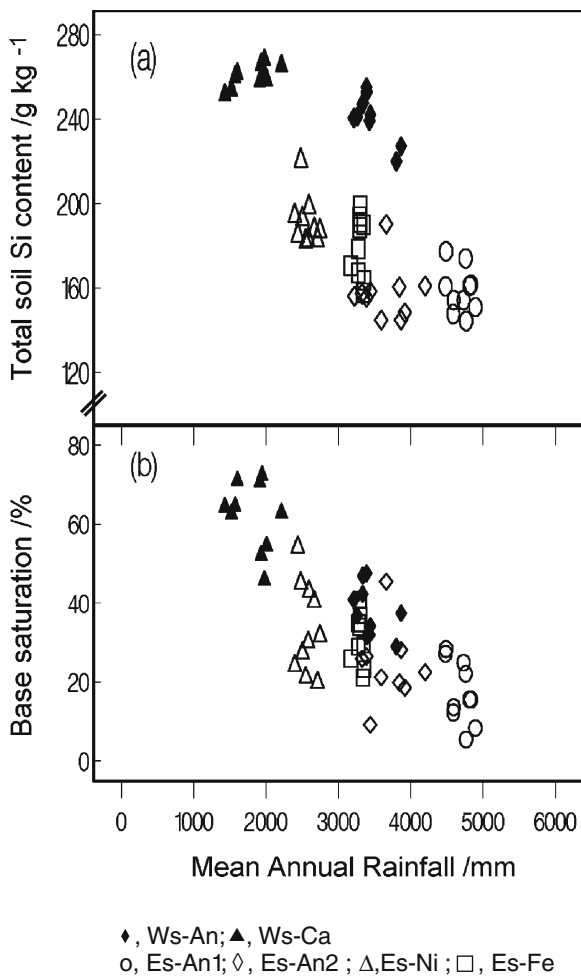


Fig. 5 Relationship between **a** total Si content and **b** base saturation in the 60 soil samples from the six experimental sites and mean annual rainfall, as computed according to Chaperon et al. (1985) for each plot

process promoting the soil-to-plant transfer of silicon. Bananas are very high nutrient-demanding plants characterized by exceptional requirements of potassium (Lahav 1995). The excess of cation over anion uptake promotes a large excretion of protons by banana roots (Rufyikiri et al. 2001), and thereby a dissolution of weatherable minerals (Hinsinger et al. 2001; Rufyikiri et al. 2004). In our case study, the silicon content of mature banana leaves is therefore linked to soil constitution and weathering stage, in turn depending on MAR and age of parent material, as discussed above.

The large proportions of Ca and Mg in the TRB of the least weathered soils (Table 3) are linked to the composition of the parent ash, dominated by plagioclase, pyroxene and ferromagnesian glass (Dagain et al. 1981; Ndayiragije 1996).

The strong and positive correlation between the leaf Si concentration and the content of non-exchangeable Ca and Na in soils ($r=0.88$; Fig. 7a) suggests that Ca and Na volcanic glasses and possibly plagioclase (Hinsinger et al. 2001) may contribute to the pool of plant-available Si. The weaker correlation between the leaf content of Si and the content of non-exchangeable Mg ($r=0.56$; Fig. 7b) suggests that part of silicate Mg may not readily contribute to that pool. Contents of non-exchangeable Mg above $50 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ are related to Si leaf concentrations generally above 6 g kg^{-1} in Ws soils, but below 4.5 g kg^{-1} in the Es Andosols Es-An1 and Es-An2. The relatively low contribution of Mg bearing silicates to the pool of plant-available Si in the Es Andosols may be due to the combination of two factors: the coating of weathered particles of ferromagnesian minerals by secondary minerals, as shown by micromorphological investigations (Ndayiragije 1996), and the occurrence of hydroxy-Al-interlayered 2:1 clay minerals (Table 1). Oxide and clay coatings can stabilize weathered primary minerals and protect them from further dissolution (Baert and Van Ranst 1997; Certini et al. 2006). The hydroxy-Al-interlayered 2:1 clay minerals contain Mg in their octahedral sheet (Ndayiragije 1996; Ndayiragije and Delvaux 2003). Al-interlayering protects these minerals from weathering (Brahya et al. 2000), as they are as stable as kaolinite in soil environments (Karathanasis et al. 1983; Karathanasis 1988). These statements further support that the pool of plant-available Si would be replenished by readily weatherable minerals in current soil conditions.

As illustrated in Fig. 2, banana leaves accumulate silicon continuously throughout their life cycle. Our data also illustrate the larger relative accumulation of Si in older leaves vs younger leaves in the Ws environments. Excluding data from Es-Fe, we computed Ws- and Es-regression lines. The regression slopes (Ws: 1.92; Es: 0.62) are significantly different ($p<0.0001$). The steep gradient of Si leaf concentration in the Ws soils can be explained by their larger Si bioavailability and possibly by the water balance.

The water balance (rainfall minus potential evapotranspiration) may indeed have affected the transfer of Si from soil to the banana plant, since silicon deposition in plants depends also on their transpiration rate (Jones and Handreck 1967). However, the

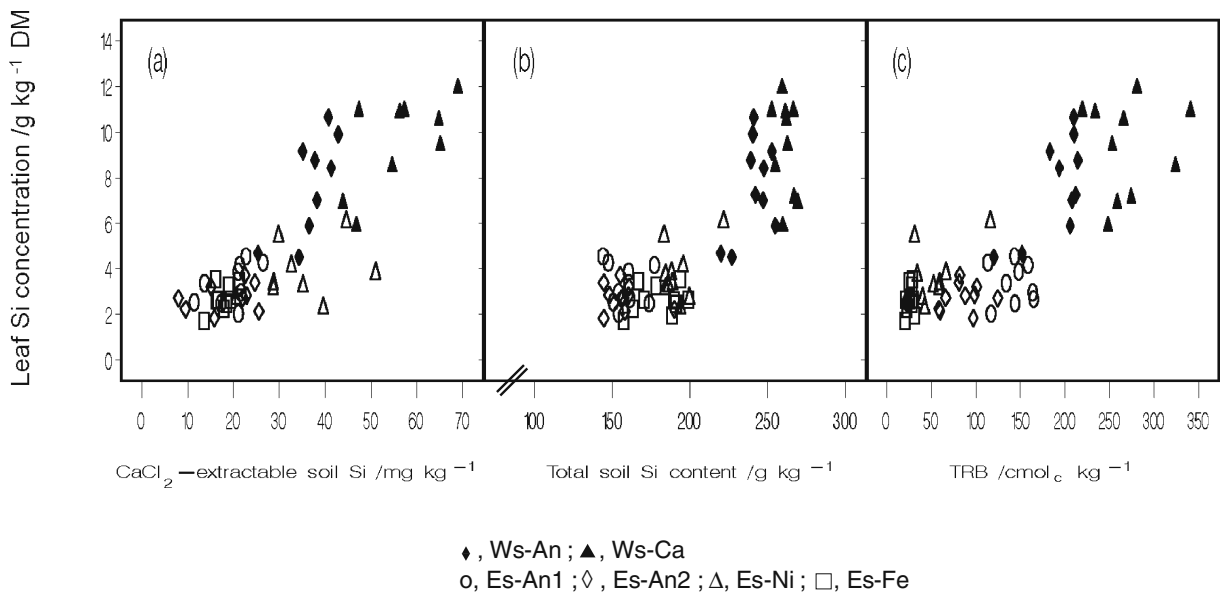


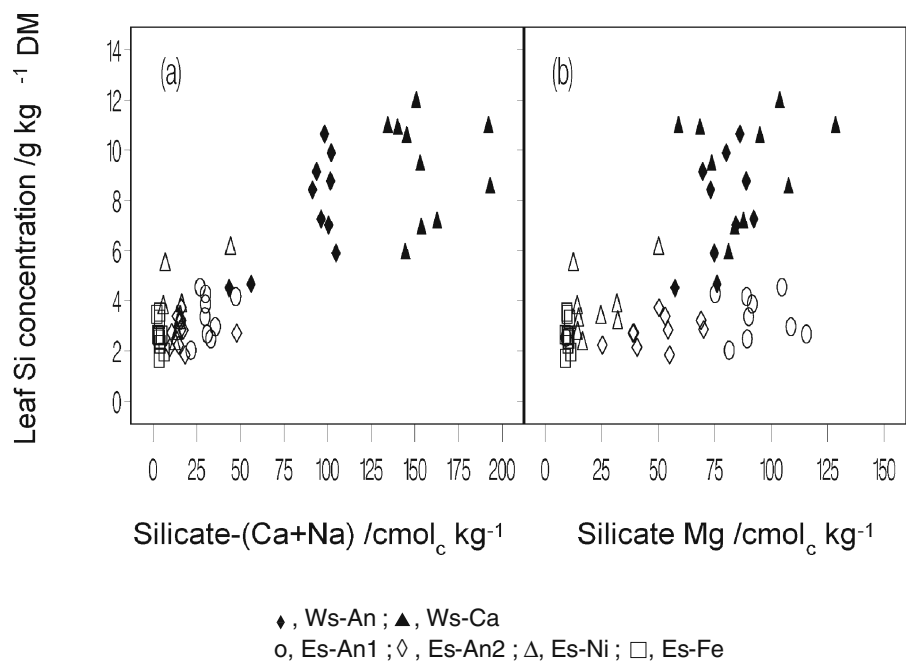
Fig. 6 Relationship between the leaf Si concentration in banana (leaf III, external part of the lamina) and: **a** the soil CaCl₂-extractable Si content, **b** the total content of Si in soil, **c**

TRB in the 60 soil samples from the six experimental sites. *Ws* Western slopes, *Es* Eastern slopes

banana plants were sampled after the long rainy season extending from April to January, i.e. a period of precipitation surplus over potential evapotranspiration. Besides, within the wettest areas (MAR > 3,000 mm; Table 1), the largest leaf Si concentrations actually

occurred in banana plants cropped on the least weathered soils Ws-An. A complementary study carried out in controlled conditions of water balance supports that soil weathering stage directly governed the soil-to-plant transfer of silicon (Henriet et al. 2008).

Fig. 7 Relationship between the leaf content of Si in banana (leaf III, external lamina) and: **a** silicate-(Ca+Na), and **b** silicate-Mg (silicate-element content = total element content minus exchangeable element content) in the 60 soil samples from the six experimental sites. *Ws* Western slopes, *Es* Eastern slopes



Conclusion

The leaf concentration of silicon in mature banana plants cropped on volcanic soils developed from andesitic ash ranged from 1.7 to 12 g kg⁻¹ depending on the availability of Si in soil, as measured through CaCl₂-extraction. Silicon availability was governed by soil constitution, and thus weathering stage: the lowest leaf Si concentrations were measured for banana plants cropped on strongly desilicated soils such as gibbstic Andosols and Ferralsols. Conversely, the highest leaf Si concentrations corresponded to the least weathered soils.

We conclude that the Si content of banana leaves reveals the weathering stage of soils developed from similar volcanic ash. Supporting previous assessments (Chadwick et al. 2003), we further conclude that such volcanic environments provide remarkable natural laboratories to conduct weathering and pedology research, as well as soil-to-plant transfer studies.

Acknowledgements We are grateful to N. De Jaeger, K. Henin, A. Iserentant and C. Givron for their strong analytical and technical support. C.H. is supported by the “Fonds pour la formation à la Recherche dans l’Industrie et dans l’Agriculture” (FRIA) of Belgium, and X.D. is a Research Associate of the “Fonds National de la Recherche Scientifique” (FNRS) of Belgium.

References

- Baert G, Van Ranst E (1997) Total reserve in bases as an alternative for weatherable mineral content in soil classification: a micromorphological investigation. In: Shoba S, Gerasimova M, Miedema R (eds) Soil micromorphology: studies on soil diversity, diagnostics, dynamics. Proc. 10th Internal Working Meeting on Soil Micromorphology, Moscow-Wageningen
- Berner RA (1995) Chemical weathering and its effect on the atmospheric CO₂ and climate. In: White AF, Brantley SL (eds) Chemical weathering rates of silicate minerals. Reviews of mineralogy. Mineralogical Society of America, Washington D.C. USA, pp 565–583
- Berthelsen S, Noble AD, Garside AL (2001) Silicon research down under: past, present, and future. In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (eds) Silicon in agriculture. Elsevier, The Netherlands, pp 241–256
- Brahy V, Titeux H, Delvaux B (2000) Incipient podzolization and weathering caused by complexation in a forest Cambisol on loess as revealed by a soil solution study. *Eur J Soil Sci* 51:475–484
- Certini G, Wilson MJ, Hillier SJ, Fraser AR, Belbos E (2006) Mineral weathering in trachydacitic-derived soils and saprolites involving formation of embryonic Halloysite and Gibbsite at Mt. Amiata, Central Italy. *Geoderma* 133:173–190
- Chadwick OA, Derry LA, Vitousek PM, Heubert BJ, Hedin LO (1999) Changing sources of nutrients during four million years of ecosystem development. *Nature* 397:491–497
- Chadwick OA, Gavenda RT, Kelly EF, Ziegler K, Olson CG, Elliott WC et al (2003) The impact of climate on the biogeochemical functioning of volcanic soils. *Chem Geol* 202:195–223
- Chao TT, Sanzolone RF (1992) Decomposition techniques. *J Geochem Explor* 44:65–106
- Chaperon P, L'Hôte Y, Vuillaume G (1985) Les ressources en eau de surface de la Guadeloupe. Editions de l'ORSTOM, collection monographies hydrologiques n°7, France
- Chapman LS, Haysom BC, Chardon CW (1981) Checking the fertility of Queensland's sugarland. *Proc Conf Aust Soc Sugar Cane Technologists* 3:325–332
- Colmet-Daage F (1969) Carte des sols des Antilles au 1/20 000. Atlas des départements français d'Outre-Mer. IGN, Paris
- Colmet-Daage F, Gautheyrou J (1974) Soil association on volcanic material in tropical America with special reference to Martinique and Guadeloupe. *Trop Agric Trinidad* 51:121–128
- Colmet-Daage F, Lagache P (1965) Caractéristiques de quelques sols dérivés de roches aux Antilles Françaises. *Cah ORSTOM Pedol* 3:91–121
- Dagain J, Paterne M, Westercamp D (1981) La mise en place du massif volcanique Madeleine-Soufrière, Basse-Terre de Guadeloupe, Antilles. *Comptes rendus de l'Académie des sciences de Paris* 292:921–926
- Delfosse T, Delmelle P, Iserentant A, Delvaux B (2005) Contribution of SO₃ to the acid neutralizing capacity of Andosols exposed to strong volcanogenic acid and SO₂ deposition. *Eur J Soil Sci* 56:113–125
- Delvaux B, Herbillion AJ, Vielvoye L (1989) Characterization of a weathering sequence of soils derived from volcanic ash in Cameroon—taxonomic, mineralogical and agromonic implications. *Geoderma* 45:375–388
- Derry LA, Kurtz CA, Ziegler K, Chadwick OA (2005) Biological control of terrestrial silica cycling and export fluxes to watersheds. *Nature* 433:728–730
- Dorel M, Roger-Estrade J, Manichon H, Delvaux B (2000) Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils. *Soil Use Manage* 16:133–140
- Epstein E (1994) The anomaly of silicon in plant biology. *Proc Natl Acad Sci U S A* 91:11–17
- Fox RL, Silva JA, Younge OR, Plucknett DL, Sherman GD (1967) Soil and plant silicon and silicate response by sugarcane. *Soil Sci Soc Am Proc* 31:775–779
- Haysom MB, Chapman LS (1975) Some aspects of the calcium silicate trials at Mackay. *Proc Conf Qld Soc Sugar Cane Technologists* 42:117–122
- Henriet C, Draye X, Oppitz I, Swennen R, Delvaux B (2006) Effects, distribution, and uptake of silicon in banana (*Musa* spp.) under controlled conditions. *Plant Soil* 287:359–374
- Henriet C, De Jaeger N, Dorel M, Opfergelt S, Delvaux B (2008) The reserve of lithogenic silicates impacts the accumulation of biogenic silicon in volcanic ash soils. *Biogeochemistry* (in press)
- Herbillion AJ (1986) Chemical estimation of weatherable minerals present in the diagnostic horizon of low activity

- clay soils. In: Beinroth MN, Camargo MN, Eswaran H (eds) Proceedings of the 8th International Classification Workshop: Classification, Characterization, and Utilization of Ultisols. Part I. EMBRAPA, Rio de Janeiro, pp 39–48
- Hinsinger P, Barros ONF, Benedetti MF, Noack Y, Callot G (2001) Plant-induced weathering of a basaltic rock: experimental evidence. *Geochim Cosmochim Acta* 65:137–152
- ISSS Working group Reference Base (1998) World reference base for soil resources: keys to reference soil groups of the World. World Soil Resource Report no. 84. FAO, Rome
- Jackson ML (1965) Soil chemical analysis—advanced course. Department of Soil Science, Madison, Wisconsin
- Jones LHP, Handreck KA (1967) Silica in soils, plants, and animals. *Adv Agron* 19:107–149
- Karathanasis AD (1988) Compositional and solubility relationship between aluminium-hydroxyinterlayered soil-smectite and vermiculite. *Soil Sci Soc Am J* 52:1500–1508
- Karathanasis AD (2002) Mineral equilibria in environmental soil systems. In: Dixon JB, Weed SB (eds) Soil mineralogy with environmental applications. Soil Science Society of America, Madison, USA, pp 109–151
- Karathanasis AD, Adams F, Hajek BF (1983) Stability relationships in kaolinite, gibbsite, and Al-hydroxyinterlayered vermiculite soil systems. *Soil Sci Soc Am J* 47:1247–1251
- Kittrick JA (1969) Soil minerals in the Al_2O_3 – SiO_2 – H_2O system and the theory of their formation. *Clays Clay Miner* 51:1457–1466
- Kump LR, Brantley SL, Arthur MA (2000) Chemical weathering, atmospheric CO_2 and climate. *Annu Rev Earth Planet Sci* 28:611–667
- Lahav E (1995) Banana nutrition. In: Gowen S (ed) Bananas and plantains. Chapman and Hall, London, pp 258–316
- Ma JF, Takahashi E (2002) Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier, The Netherlands
- Ma JF, Tamai K, Yamaji N, Mitani N, Konishi S, Katsuhara M et al (2006) A Silicon transporter in rice. *Nature* 440:688–691
- Martin-Prével P (1980) La nutrition minérale du bananier dans le monde—Première partie. *Fruits* 35:503–518
- Moulton KL, West J, Berner RA (2000) Solute flux and mineral mass balance approaches to the quantification of plant effects on silicate weathering. *Am J Sci* 300:539–570
- Ndayiragije S (1996) Caractérisation d'une séquence d'altération de sols dérivés de matériaux pyroclastiques sous climat tropical humide des Antilles (Guadeloupe). PhD thesis, Université catholique de Louvain, Belgium
- Ndayiragije S, Delvaux B (2003) Coexistence of allophane, gibbsite, kaolinite and hydroxy-Al-interlayered 2:1 clay minerals in a Perudic Andosol. *Geoderma* 117:203–214
- Ndayiragije S, Delvaux B (2004) Selective sorption of potassium in a weathering sequence of volcanic ash soils from Guadeloupe, French West Indies. *Catena* 56:185–198
- Nieuwenhuys A, Jongmans AG, van Breemen N (1994) Mineralogy of Holocene chronosequence of andesitic beach sediments in Costa Rica. *Soil Sci Soc Am J* 58:485–494
- Parfitt RL, Russell M, Orbell GE (1983) Weathering sequence of soil from volcanic ash involving allophane and halloysite, New Zealand. *Geoderma* 29:41–57
- Pineros Garcet JD (1994) Etude d'une climatoposéquence de sols dérivés de matériaux volcaniques récents (Côte sous-vent de la Basse-Terre). MSc thesis, Université catholique de Louvain
- Rai D, Kittrick JA (1989) Mineral equilibria and the soil system. In: Dixon JB, Weed SB (eds) Minerals in soil environments. Soil Science Society of America, Madison, USA, pp 161–198
- Raven JA (2001) Silicon transport at the cell and tissue level. In: Datnoff LE, Snyder GH, Korndörfer GH (eds) Silicon in agriculture. Elsevier, The Netherlands, pp 41–55
- Rufyikiri G, Nootens D, Dufey J, Delvaux B (2001) Effect of aluminium on bananas (*Musa* spp.) cultivated in acid solutions. II. Water and nutrient uptake. *Fruits* 56:3–14
- Rufyikiri G, Nootens D, Dufey JE, Delvaux B (2004) Mobilization of aluminium and magnesium by roots of banana (*Musa* spp.) from kaolinite and smectite clay minerals. *Appl Geochem* 19:633–643
- Smetacek V (1999) Diatoms and the ocean carbon cycle. *Protist* 150:25–32
- Smithson F (1956) Plant opal in soil. *Nature* 178:107
- Sommer M, Kaczorek D, Kuzyakov Y, Breuer J (2006) Silicon pools and fluxes in soils and landscapes—a review. *J Plant Nutr Soil Sci—Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde* 169:310–329
- Van der Vorm PDJ (1980) Uptake of Si by five plants species, as influenced by variations in Si-supply. *Plant Soil* 56:153–156



SIMBA-N: Modeling nitrogen dynamics in banana populations in wet tropical climate. Application to fertilization management in the Caribbean

Marc Dorel^{a,*}, Raphaël Achard^b, Philippe Tixier^{b,1}

^a CIRAD, UPR 26, Neufchâteau, 97130 Capesterre Belle-Eau, Guadeloupe, French West Indies, France

^b CIRAD, UPR 26, PRAM, BP 214, 97285 Lamentin Cedex 2, Martinique, French West Indies, France

ARTICLE INFO

Article history:

Received 13 November 2007

Received in revised form 19 February 2008

Accepted 24 February 2008

Keywords:

Banana
Fertilization
Plant population structure
Leaching
Crop residue
SIMBA
French West Indies

ABSTRACT

In banana plantations of the Caribbean, nitrogen (N) fertilization widely exceeds nutrient outputs after harvest. Under wet tropical climate, leaching results in considerable waste of N. Fertilization management aims at maintaining soil mineral N at the optimal level for banana nutrition throughout the year but it does not take into account variations in crop N demand or N supply through mineralization of crop residues. The dynamics of crop N demand and crop residue supply depend on the structure of banana populations, which become asynchronous with time. We designed the SIMBA-N model to simulate N dynamics in successive crop cycles of banana. The model calculates the N balance weekly, including N uptake by banana, N leaching, and N supply by organic matter mineralization. We validated the model using data from a field experiment comparing five levels of fertilization. Results showed SIMBA-N provides reliable indicators to support banana fertilization management taking into account N flows in the soil and change in N demand related to banana population structure.

© 2008 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In the Caribbean, bananas are grown under a wet tropical climate with heavy rainfall (2000–6000 mm annually) and harvested throughout the year. Godefroy and Dormoy (1983) determined the frequency of fertilizer applications as a function of rainfall with the aim of maintaining soil mineral nitrogen (N) above a critical threshold for banana nutrition. This method, however, does not take into account the dynamics of plant demand and crop residue supply. Hence, the amounts of N fertilizers applied widely exceed N outputs after harvest. In intensive banana plantations, 400 kg ha⁻¹ year⁻¹ of N are generally applied while N exports at harvest rarely exceed 100 kg ha⁻¹ year⁻¹. It thus appears that large amounts of the mineral N are lost by leaching or run-off. To reduce N wastes in the Caribbean, N crop supply must be adjusted to plant demand for environmental and economic reasons.

Bananas are rhizomatous herbs whose terminal bud produces the inflorescence. Each plant successively produces a series of bunches, each from a lateral shoot. Banana crops represent a collection of individual plants derived from vegetative propagules. They

develop at their own rhythm and do not follow a synchronous cycle. At any given time, a banana crop consists of a population of individual plants at various developmental stages. The dynamics of banana biomass production reveal peaks whose amplitudes tend to be wider over time, until biomass production is continuous after five to seven cropping cycles.

The SIMBA-POP model (Tixier et al., 2004) was designed to simulate the population structure, and fruit and biomass production for bananas. Generic crop simulation models such as STICS (Brisson et al., 2003), CROPSYST (Stöckle et al., 2003), or APSIM (Keating et al., 2003) simulate mechanisms involved in production and transfer of mineral N. These models were designed for annual crops with homogeneous plant populations. Such models can be used for the first banana crop cycle (Brisson et al., 1998) but are not adapted as soon as the plant population structure becomes heterogeneous. Indeed, those models cannot properly simulate the dynamics of crop residue return and N uptake in perennial plant populations whose development stages become asynchronous with time.

Models specifically designed to manage N fertilization in annual crops under temperate climate and based on balance-sheet methods such as Azobil (Machet et al., 1990) or Azodyn (Jeuffroy and Recous, 1999) do not take into account N leaching during crop growth. Thus they cannot operate properly in the case of over-fertilized perennial crops under heavy rainfall such as intensive banana crops in the Caribbean.

* Corresponding author. Tel.: +33 590 05 90 86 17 59; fax: +33 596 05 90 86 80 77.
E-mail addresses: dorel@cirad.fr (M. Dorel), tixier@cirad.fr (P. Tixier).

¹ Tel.: +33 596 05 96 42 30 17; fax: +33 596 05 90 42 30 01.

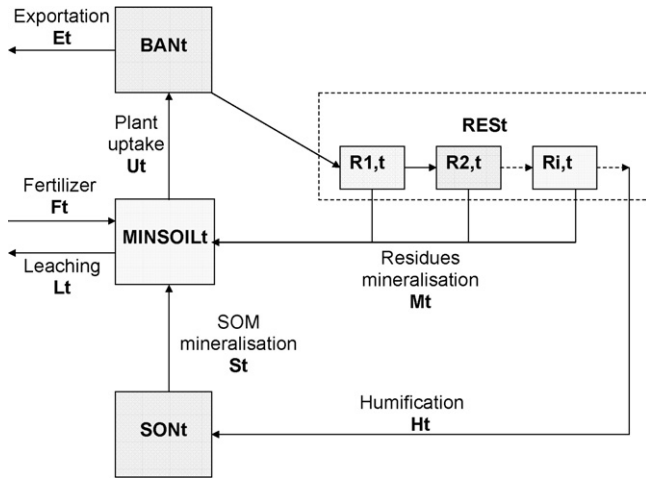


Fig. 1. General structure of SIMBA-N model.

We present here the SIMBA-N model designed to simulate crop requirements and soil N dynamics under banana cultivation. The model was validated by comparing observed and simulated soil mineral N dynamics in a fertilization experiment. Observed indicators of plant growth and plant N nutrition were also compared to N Stress Index computed by the model. We used the model to investigate the effect of soil-climate conditions and fertilization practices in volcanic ash soil of Guadeloupe on N leaching and availability.

2. Material and methods

2.1. Model description

SIMBA-N was developed using the STELLA® software environment from High Performance System® (Lebanon, NH, USA). The general structure of the SIMBA-N model is presented in Fig. 1. SIMBA-N computes at a weekly step a dynamic soil N balance under banana cultivation as shown in Eq. (1).

$$\text{MINSOIL}_t = \text{MINSOIL}_{t-1} + F_t + S_t + M_t - U_t - L_t \quad (1)$$

Stock and flow variables involved in N balance are presented in Table 1.

We assumed that N volatilization and denitrification were low in Caribbean volcanic ash soils (Sierra et al., 2001; Thieuleux, 2006) and balanced by N deposition from the atmosphere (Jeuffroy and Recous, 1999). For this reason, these N flows were not considered in the model. We considered that only mineral fertilizers were applied and that N from fertilizers was transferred to soil mineral N stock as

soon as applied. SIMBA-N calculates N outputs related to leaching and plant uptake and N inputs related to crop residues and soil organic matter mineralization.

2.1.1. Leaching

Mineral N leaching L_t is calculated at a weekly step using the equation of the NLEAP model designed by Shaffer et al. (1994):

$$L_t = \text{MINSOIL}_t \left(1 - \exp \left(-K_{\text{lea}} \frac{(R_t - \text{PET}_t)}{\text{SW}} \right) \right) \quad (2)$$

with R_t = rainfall at step t (mm); PET_t = potential evapotranspiration (mm); SW = soil water stock at saturation (mm); K_{lea} = leaching coefficient depending on physical soil characteristics.

According to Dorel et al. (2000) and Sansoulay (2006), SW and K_{lea} are respectively equivalent to 200 mm and 0.7 for the andosols of Guadeloupe.

2.1.2. Nitrogen crop uptake

We assumed that N crop uptake was driven by crop dry matter production. The SIMBA-POP model (Tixier et al., 2004) was used to calculate crop dry matter. This model enables one to simulate the evolution of banana population structure and the dynamics of crop dry matter throughout the successive production cycles of a banana plot (Fig. 2). For each production cycle, crop dry matter increases until harvest. At harvest, the mother plant is cut and the crop dry matter is reduced to the dry matter of the sucker selected for the following production cycle. The passage from one production cycle to the next does not induce discontinuity in the dry matter curve because the model takes into account the heterogeneity of developmental stages in the banana population.

The plant N concentration at step t (NC_t) is calculated as a function of crop dry matter amount (DM_t) according to the reference critical dilution curve proposed by Greenwood et al. (1990) for C3 plants as presented in Eq. (3).

$$\begin{cases} \text{If } \text{DM}_t < 2(\text{tons/ha}) \\ \text{Then } \text{NC}_t = 4\% \\ \text{Else } \text{NC}_t = 5.7 \text{DM}_t^{-0.5} \end{cases} \quad (3)$$

NC_t serves to determine crop N demand. The actual crop uptake is equal to the minimum of mineral N available in the soil and crop demand.

2.1.3. Crop residue mineralization

Crop residues return to soil following the harvest dynamics pattern simulated with the SIMBA-POP model with peaks that tend to spread over time (Tixier et al., 2004). We considered that a residual fraction K_1 of N of crop residues remains in organic form and

Table 1
Stock and flow variables of SIMBA-N (expressed in kg ha^{-1} of N)

Stock variables	
MINSOIL_t	Soil Mineral N at step t
SON_t	Soil Organic N at step t
BAN_t	Banana N content at step t
RES_t	Crop Residue N at step t
$R_{i,t}$	Mineral N of crop residues aged of i weeks at step t
Flow variables	
F_t	Mineral N fertilized at step t
L_t	Mineral N leached at step t
U_t	Mineral N plant uptake at step t
E_t	Mineral N exported (bunch) at step t
M_t	N mineralized from residues at step t
S_t	N mineralized from soil organic matter at step t
H_t	N humification from residues at step t

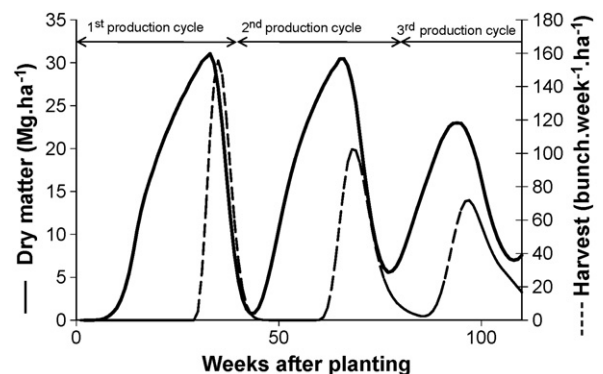


Fig. 2. Dry matter dynamics and harvest dynamics in a bananas population simulated at the plot scale with the SIMBA-POP model.

is transferred to soil organic N pool (H_t). The other part mineralizes directly. According to Thieuleux (2006), the mineralization rate (M_i) of this fraction varies with time as a decreasing exponential function (Eq. (4)).

$$M_i = \exp(K_{deg1} + K_{deg2}i) \quad (4)$$

where i is the number of weeks since crop residue return and K_{deg1} , K_{deg2} two parameters characterizing the mineralization dynamics of organic N respectively equal to 3.2 and -0.19 for banana crop residues.

2.1.4. Soil organic matter mineralization

In the Caribbean, bananas are grown in volcanic ash soil under wet tropical climate where soil temperature and water content changes throughout the year are small. In such conditions we assumed that mineral N produced weekly by soil organic matter mineralization (S_t) is only related to soil organic N content (SON_t) and can be calculated according to Eq. (5).

$$S_t = K_{som1}SON_t + K_{som2} \quad (5)$$

where K_{som1} and K_{som2} are two parameters depending on soil characteristics.

2.1.5. Nitrogen Stress Index

According to Godefroy and Dormoy (1983), N nutrition stress occurs in banana plantations if soil mineral N falls below 40 kg ha^{-1} . We defined an N Stress Index at step t (NSI_t) as follows:

$$\begin{cases} \text{If } NMINSOIL_t > 40 \text{ kg ha}^{-1} \\ \text{Then } NSI_t = 1 \\ \text{Else } NSI_t = \frac{NMINSOIL_t}{40} \end{cases} \quad (6)$$

2.2. Model sensitivity analysis

A sensitivity test was performed to assess the effect on model outputs (N leaching and NSI) of the variation in soil-climate characteristics and fertilization practices encountered in the banana plantations of Guadeloupe. In Guadeloupe, banana plantations are mainly located on volcanic ash where soil and climate characteristics change in accordance with altitude (Dorel et al., 2005). Three sites located at different altitudes on a soil-topo sequence of the east side of the volcanic island of Basse-Terre and equipped with automatic meteorological stations were selected. Simulations were performed using mean daily rainfall, temperature and radiation calculated from data recorded on these sites between 2000 and 2005. Soil parameters used for simulations were determined according to the results of Dorel et al. (2006) obtained on the same soil-topo sequence. Main soil-climate characteristics of the three sites are presented in Table 2. Simulations were also performed to test

Table 3

Soil characteristics of the experimental plot, in the ploughed layer (0–30 cm).

Soil characteristics	Value
Soil organic N (kg ha^{-1})	6400
Soil mineral N (kg ha^{-1})	20
Bulk density (Mg m^{-3})	0.8
Water content at field capacity (g g^{-1})	0.75
Clay (%)	62
Silt (%)	32
Sand (%)	6

the effects on model outputs of the amount of nitrogen fertilizer applied each year and the effect of different frequency of fertilizer application.

2.3. Experiment

2.3.1. Experimental design

An experiment was carried out to evaluate the effect of different levels of N fertilization on soil N availability and banana growth. The experimental plot was at the CIRAD research station of Neuchâteau (Guadeloupe, $16^\circ 13' \text{ N}$, $61^\circ 36' \text{ W}$, altitude 250 m). The soil, developed on recent volcanic deposits, was classified as andosol. The average annual rainfall recorded on Neuchâteau site is 3500 mm.

Before the beginning of the experiment, the plot was left for two years under a sanitation fallow; weeds were controlled by scheduled applications of herbicide to prevent plant-parasitic nematode conservation. Soil characteristics at the beginning of the experiment are presented in Table 3.

After planting with banana plants from tissue culture (*Musa* spp., AAA group, cv. Cavendish Grande Naine; Vitropic SA, Saint Mathieu de Trévières, France), five distinct fertilization treatments were applied on separate plots: 20, 120, 220, 320, and $420 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of N (T0, T1, T2, T3, and T4, respectively). For each treatment, yearly fertilization was split into 12 applications monthly. Each treatment was randomly replicated on five 500 m^2 elementary plots of 90 banana plants each. The experiment was monitored from the planting (February 2005) to the flowering stage of the third production cycle (January–April 2007).

2.3.2. Measurements

- Rainfall and temperature were recorded hourly on the site during the experiment.
- Basal girth of banana pseudo-stem was measured monthly till flower emergence for each of the three production cycles. At the flower emergence stage, the number of fruits per bunch was recorded.
- Mineral N content of the 0–30 cm soil layer was determined every month. The day before fertilizer application, 30 core sam-

Table 2

Soil parameters and climate characteristics of three sites of the eastern coast of Basse-Terre (Guadeloupe)

	Location		
	Site 1 Monrepos	Site 2 Neuchateau	Site 3 Bois Rouge
Altitude (m)	80 m	250 m	420 m
Soil classification	Nitisol	Andosol	Perhydrated andosol
Mean annual rainfall (mm)	2000	3000	4500
Mean temperature ($^\circ \text{C}$)	25.5	24.4	22.7
Soil organic matter content (%)	3	8	19
SOM mineralization parameters of SIMBA ^a			
K_{som1}	0.001	0.002	0.002
K_{som2}	20.841	−6.112	−6.112

^a According to Dorel et al. (2006).

ples were taken in each elementary plot with a 60 mm diameter auger and mixed to obtain a composite sample. Mineral N was colorimetrically measured after extraction with a 1 N KCl solution.

- Chlorophyll content of the last unfolded leaf was measured each month with a light transmittance chlorophyll meter (SPAD-502, Minolta).

2.4. Statistical methods

We used the normalized root mean square error (RMSE) to analyze the accuracy of model predictions. Normalized RMSE (expressed in percent) was calculated according to Loague and Green (1991) as follows:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \times \frac{100}{M} \quad (7)$$

where P_i and O_i are predicted and observed values and M the mean of the observed variable.

Results of fertilization experiments were analyzed through ANOVA. Mean values were compared using Newman–Keuls test (threshold 5%).

3. Results

3.1. Model calibration

3.1.1. Crop residue mineralization – K_1 parameter determination

The decomposition of banana crop residues produced high amounts of residual organic matter which incorporate into soil organic matter pool. Godefroy (1974) reported that the residual fraction of organic N represented about 60% of the initial N content of banana crop residues. Furthermore, the basal part of the harvested banana, which contains 35% of the N crop residues (Marchal and Malessard, 1979), does not decompose immediately. In fact, the corm of the harvested plant can remain alive for several months (sometimes several years) before decomposition occurs. Factors determining corm decomposition after harvest are not well known but seem related to soil biology. Consequently we assumed that only 25% of the N of crop residues was directly mineralized and that K_1 could be assessed at 75%.

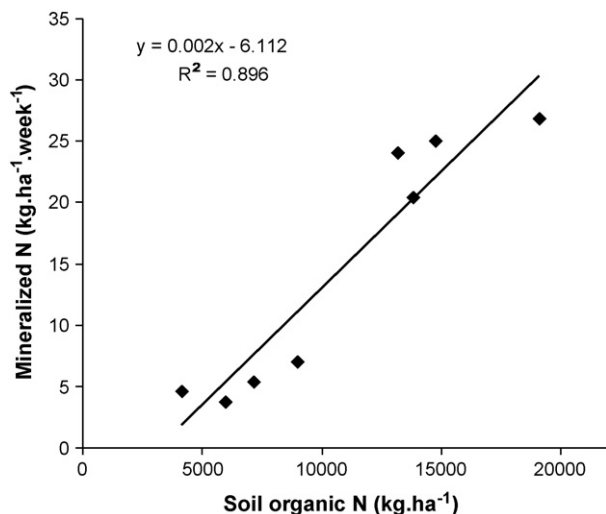


Fig. 3. Nitrogen mineralized as a function of the soil organic N in andosols of Guadeloupe.

Table 4

Normalized RMSE for Log(MINSOIL) and correlation (R^2) between observed and simulated values for the five treatments of the experiment

Treatments	T0	T1	T2	T3	T4
Normalized RMSE (%)	26.12	22.98	24.32	24.11	15.46
R^2	0.69	0.91	0.61	0.72	0.67

3.1.2. Soil organic matter – mineralization rate determination

Test incubation carried out with andosols from Guadeloupe (Dorel et al., 2006) showed a linear relation between amounts of N mineralized and soil organic N content (Fig. 3). According to these results, K_{som1} and K_{som2} were estimated to be 0.002 and –6.112 respectively for andosols.

3.2. Comparison of simulation and experimental results

3.2.1. Model validation

Model validation was achieved by comparing observed and simulated soil mineral N dynamics for the three crop cycles in the five treatments of the fertilization experiment (Fig. 4). Simulations were performed with initial soil characteristics presented in Table 3. As shown in Table 3, the correlation coefficients between observed and simulated data in the five experimental treatments ranged from 0.61 to 0.91. After Log transformation of observed and simulated values of the NMINSOIL variable to reduce amplitude variations, normalized RMSE (Loague and Green, 1991) was calculated to evaluate the accuracy of SIMBA-N (Table 4). According to Jamieson et al. (1991), the accuracy in the prediction can be considered fair for T0, T1, T2, T3, and good for T4. However, despite a better accuracy in the prediction for the highest fertilization level, our results do not allow a clear correlation between model accuracy and fertilization level.

3.2.2. Simulated Nitrogen Stress Index and observed indicator of nitrogen nutrition

Chlorophyll meter readings (CHLr) can be used as an indicator of N nutrition, provided that readings can be related to a reference reading carried out at the same time on well-fertilized plants (Piekielek et al., 1995; Spaner et al., 2005; Arregui et al., 2006). We assumed that the T4 treatment of fertilization experiment ($420 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of N) enabled optimal N nutrition conditions for bananas and could be a reference for chlorophyll meter readings. We investigated the relationship between CHLr, taken as indicator of N nutrition observed in the field and NSI computed with the model. NSI can be computed from soil mineral N stock weekly or from the mean value of soil mineral N during a longer period. NSI calculated from soil mineral N stock weekly was correlated with CHLr ($R^2 = 0.49$). However, the best correlation between CHLr and NSI ($R^2 = 0.61$) was observed when NSI was computed from the mean values of soil mineral N recorded for the four weeks preceding the measurement date (Fig. 5).

3.2.3. Simulated Nitrogen Stress Index and banana growth and development

Fig. 6 presents the increase in banana pseudo-stem girth during three crop cycles. During the first crop cycle, banana growth was equivalent for the different treatments. From the second cycle, banana girth in treatment T0 became significantly lower than in the other treatments. However, due to slower development, the growth period was longer for T0, and the pseudo-stem girths reached at flowering time were not significantly different for the five fertilization treatments. The number of fruits per bunch, which

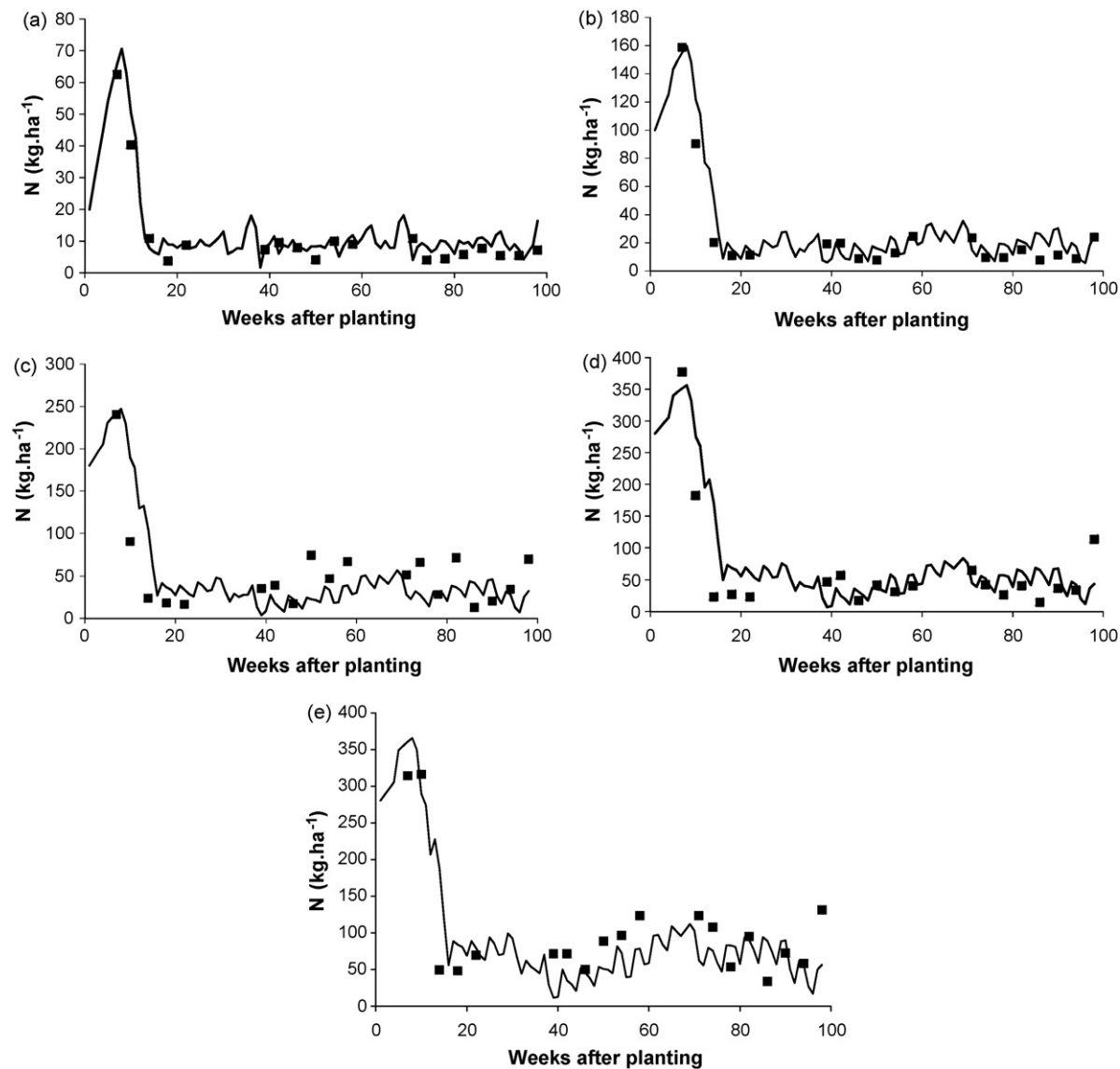


Fig. 4. Soil mineral N observed (■) and simulated (–) for treatments T0 (a), T1 (b), T2 (c), T3 (d), and T4 (e) with 20, 120, 220, 320, and 420 kg ha⁻¹ year⁻¹ of N, respectively.

can be considered as an indicator of the expected yield, was not significantly different either.

Simulated NSI values for treatments T0, T1, T2, T3, and T4 (Fig. 7) are ordered according to the fertilization level. In T0 treatment, strong N stress held on three months after planting. In T1 and T2 treatments, despite NSI values indicating moderate nutritional stress, plant growth and development were not significantly affected. These results suggest that N nutritional stress significantly reduces plant growth and slows down plant development only in case of heavy stress (T0 treatment). Effects of moderate stress on plant growth and development are only slight.

3.3. Model sensitivity to soil-climate conditions and fertilization practices

We tested model sensitivity to soil-climate variations using three sets of soil-climate data corresponding to the three sites presented in Table 3. The simulations were operated with a standard N fertilization of 400 kg ha⁻¹ year⁻¹ split into 12 monthly applications. Simulated soil mineral N and NSI dynamics for the three sites are shown on Fig. 8a–c and can be correlated to rainfall (Fig. 8d). Table 5 presents the mean value of NSI and the cumulated N leaching over the simulation period. In the site 3 located at the

Table 5
Mean Nitrogen Stress Index (NSI) and cumulated N leaching calculated from SIMBA-N simulation for three production cycles

	Site 1	Site 2	Site 3
Mean NSI	0.64	0.99	0.99
Cumulated N leaching (kg ha ⁻¹)	372	1196	2235

Table 6
Cumulated N Leaching and mean NSI calculated with SIMBA-N for three production cycles

Treatments	T0	T1	T2	T3	T4
N leaching (kg ha ⁻¹)	104	274	554	729	1067
NSI	0.21	0.54	0.82	0.95	0.98

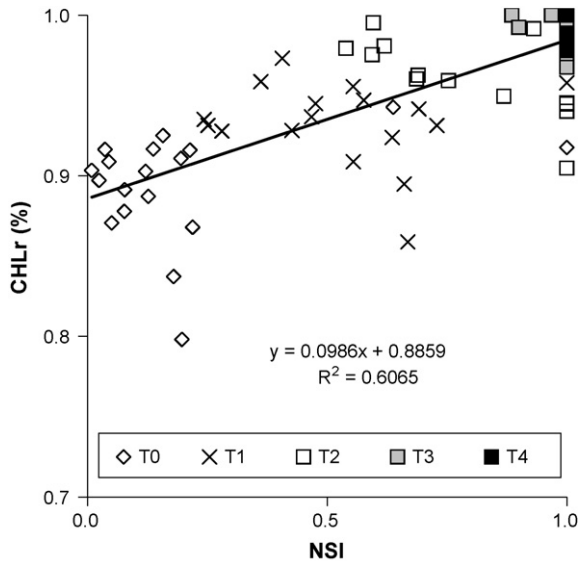


Fig. 5. CHLr as a function of NSI calculated from mean soil mineral N of the four weeks preceding the measurement.

highest altitude (420 m), despite very high levels of N leaching, N availability was suitable and allowed proper plant nutrition (NSI keep value closed to 1). In the site 2 (altitude 250 m), N availability was suitable too, but N leaching was much lower than in site 3. In site 1 (altitude 80 m), in spite of N fertilization exceeding plant uptake, high NSI variations indicate that N availability was not sufficient to maintain proper plant nutrition throughout the year. In this site, simulated N leaching was lower than in the other sites but remained relatively high. Soil organic matter stock was low and N supply through mineralization was not sufficient to maintain the N balance. These simulations show that with the same fertilization level, soil-climate variations at production basin scale result in high differences in N availability and N leaching. N availability variation can be related to N supply through mineralization of variable stocks of soil organic matter.

We also tested the effect of annual N fertilizer amount on N leaching and NSI. We used the dataset corresponding to the five treatments of the fertilization experiment. As shown on Table 6, N leaching varied widely with fertilization level. With the highest fertilization level T4, N leaching exceeded 1000 kg ha^{-1} and was

10 time higher than with T0. NSI also varied widely with fertilization level. NSI values close to 1, indicating proper N nutrition, were found with T3 and T4 treatment for which leaching was very high. N leaching was much lower with T0 and T1 but the model simulated N stress in this case. According to model simulation, none of the five fertilization treatments enables proper N nutrition and low N leaching.

The effect of increasing fertilization splitting from monthly to weekly applications was simulated with SIMBA-N for a standard annual N fertilization of 400 kg ha^{-1} . NSI and N leaching dynamics are shown on Fig. 9a and b. Increasing fertilization splitting led to only slightly modified NSI and N leaching. These simulations indicate that increasing fertilizer application frequency does not greatly improve N fertilizer efficacy.

4. Discussion

We have shown that SIMBA-N allows proper simulation of the effect of fertilization level on soil mineral N dynamics under banana cropping in volcanic ash soil of Guadeloupe. Simulations showed that, whatever the fertilizer amount applied each month, it is difficult to match proper N availability and low N leaching in banana plantations. Proper N availability for banana nutrition was obtained for fertilization levels above $300 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, but these fertilization levels lead to high N leaching. For a given fertilization level, increasing application frequency only slightly changes N leaching and N availability. In most soil-climate conditions of Guadeloupe, the implementation of the critical rainfall threshold method (Godefroy and Dormoy, 1983) led to advise monthly applications of fertilizer. In most cases, this standard fertilizer application frequency seems to be a good compromise between fertilizer efficiency and labor cost for application.

Soil and climate change with altitude can be taken into account with SIMBA-N. The simulations performed with different soil-climate conditions showed that the high soil organic N contents at high altitudes improve N availability, in spite of high rainfall, without increasing fertilizer supply. Simulation results are in agreement with results of Godefroy and Dormoy (1983) on volcanic ash soil of Martinique. Indeed, those authors reported marked change with altitude in N availability related to soil organic matter content. They suggested to take into account N from soil organic matter mineralization in banana fertilization of high altitude banana plantations. Increasing soil organic matter content may thus be a way to improve the sustainability of banana cropping systems.

Our experimental results showed that moderate N nutrition stress had no appreciable effect on plant growth and develop-

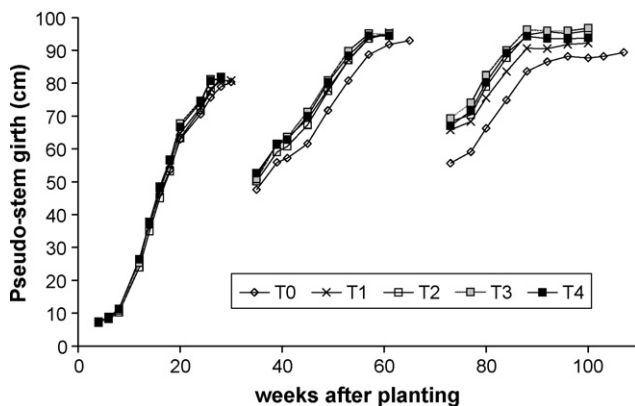


Fig. 6. Pseudo-stem girth variation for three production cycles ($n=10$) for treatments T0, T1, T2, T3, and T4 with 20, 120, 220, 320, and $420 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of N, respectively (the last point of each growth curve corresponds to flowering stage).

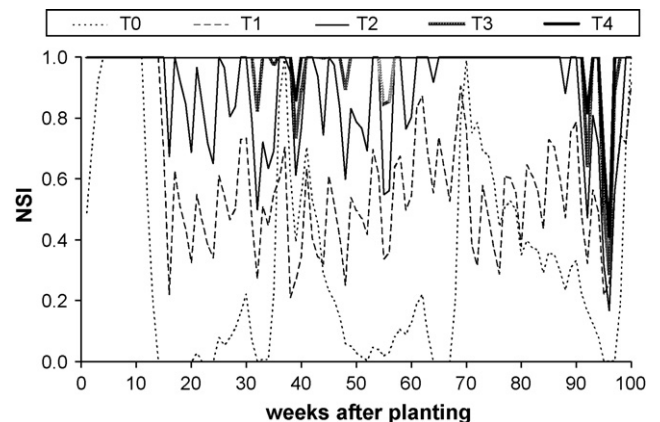


Fig. 7. Nitrogen Stress Index simulated with SIMBA-N for treatments T0, T1, T2, T3, and T4 with 20, 120, 220, 320, and $420 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ of N, respectively.

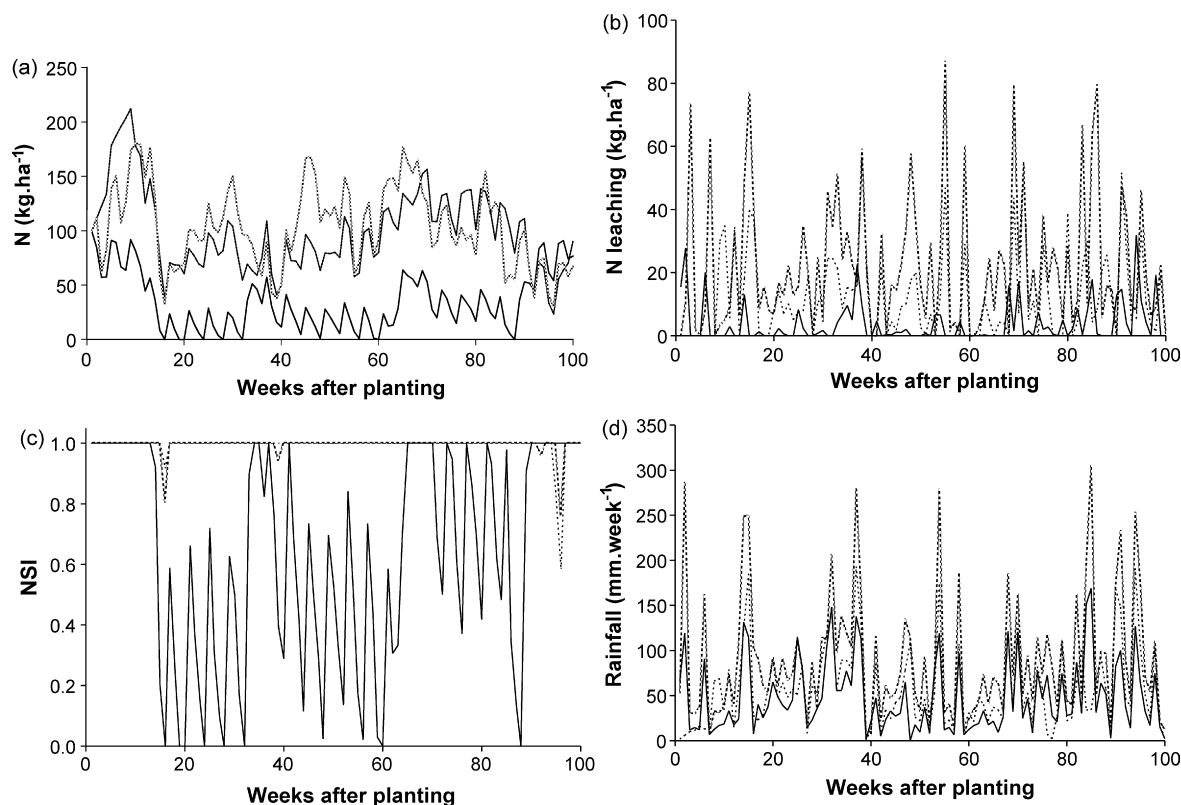


Fig. 8. Soil mineral N dynamics (a), N leaching (b), N Stress Index (c), and rainfall (d) for sites 1 (—), sites 2 (---), and site 3 (·····).

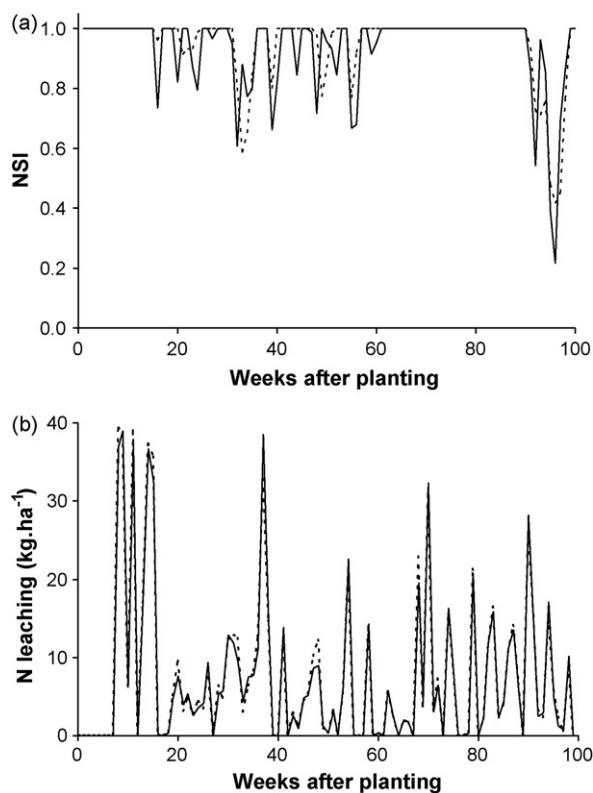


Fig. 9. Effect of splitting fertilization weekly (---) and monthly (—) on NSI (a) and N leaching (b), with a fertilization of $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$.

ment. Only heavy stress, as observed in T0 treatment, slowed down plant growth and delayed development. Such stress conditions rarely occur in field conditions, particularly in intensive banana plantations of the Caribbean. As SIMBA-N does not simulate the effect of N stress on plant growth and development, this model could have limitations in case of poor fertility soil with low levels of fertilization.

We demonstrated that the relative chlorophyll content of leaves was sensitive to fertilization level. This indicator of plant N nutrition was correlated with the N Stress Index computed with SIMBA-N from soil available N. However, the chlorophyll content of leaves can depend on other factors such as water stress or temperature (Arregui et al., 2006). Chlorophyll content measurement and N Stress Index computed with SIMBA-N N Stress Index could be used together as fertilization management support to identify more reliably the period of N deficiency and decide on complementary fertilizer supply.

We assumed that a large part of the N from banana crop residues was directly transferred to soil organic N pool. In fact the fate of N of the harvested banana plant is poorly documented. The basal part of the harvested banana keeps vascular connections with the sucker. N from the harvested banana may be transferred directly to the sucker through these connections (Twyford and Walmsley, 1974) or enter the soil food web through decomposer activity. The decomposition rate of the basal part of the harvested banana (corm, pseudo-stem) seems to depend on biological factors (macro fauna, bacteria, fungi) that vary greatly with growth conditions. Model prediction accuracy could be improved by better knowledge of these processes.

5. Conclusion

SIMBA-N properly simulates the N dynamics in Caribbean volcanic ash soil under banana cropping. In wet tropical climate, the

challenge with banana fertilization is not to balance N outputs globally but to keep the available N stock high enough throughout the year to meet plant requirements and low enough to avoid massive N leaching. SIMBA-N provides reliable indicators to support banana fertilization management taking into account soil N stock and change in N demand related to banana population structure. SIMBA-N is also used within the global cropping system model SIMBA (Tixier, 2004) and helps designing more sustainable cropping systems.

Acknowledgement

We would like to thank Steewy Lakhia, (CIRAD) and Lucienne Desfontaine (INRA) for their technical help.

References

- Arregui, L.M., Lasa, B., Lafarga, A., Iraneta, I., Baroja, E., Quemadac, M., 2006. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. *Eur. J. Agron.* 24, 140–148.
- Brisson, N., Dorel, M., Ozier-Lafontaine, H., 1998. Effects of soil management and water regime on banana growth between planting and flowering. Simulation using STICS model. In: *Proceedings of International Symposium on Banana in Subtropics*, ISHS, Acta Horticulturae, vol. 490, pp. 229–238.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussière, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillière, J.P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model STICS. *Eur. J. Agron.* 18, 309–332.
- Dorel, M., Roger-Estrade, J., Manichon, H., Delvaux, B., 2000. Porosity and soil-water properties of Caribbean volcanic ash soil. *Soil Use Manage.* 16, 133–140.
- Dorel, M., Lombard, K., Oliver, R., 2005. Azote minéralisable et statut organique des Andosols de Guadeloupe. *Etude et Gestion des Sols* 12, 267–280.
- Dorel, M., Tixier, P., Achard, R., 2006. Management of banana nitrogen fertilization: taking into account nitrogen from organic origin. In: *Proceedings of XVII Acorbat meeting*, Joinville, Brasil, vol. 2, pp. 634–637.
- Godefroy, J., 1974. Evolution de la matière organique du sol sous culture du bananier et de l'ananas. Relations avec la structure et la capacité d'échange cationique. Doctoral Thesis University of Nancy, France, 166 p.
- Godefroy, J., Dormoy, M., 1983. Dynamique des éléments minéraux fertilisants dans les sols des bananeraies martiniquaises. *Fruits* 38 (6), 451–459.
- Greenwood, D.J., Lemaire, G., Gosse, G., Cruz, P., Draycott, A., Neeteson, J.J., 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Ann. Bot.* 66, 425–436.
- Jamieson, P.D., Porter, J.R., Wilson, D.R., 1991. A test of the computer simulation model ARC-WHEAT1 on wheat crops grown in New Zealand. *Field Crops Res.* 27, 337–350.
- Jeuffroy, M.H., Recous, S., 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *Eur. J. Agron.* 10, 129–144.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verbug, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *Eur. J. Agron.* 18, 267–288.
- Loague, K., Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *J. Contam. Hydrol.* 7, 51–73.
- Machet, J.M., Dubrulle, P., Louis, P., 1990. AZOBIL: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method. In: Scaife, A. (Ed.), *Proceedings of 1st Congress of the European Society for Agronomy*. Paris, pp. 21–22.
- Marchal, J., Malessard, R., 1979. Comparaison des immobilisations minérales de quatre cultivars de bananiers à fruits pour cuisson et de deux «Cavendish». *Fruits* 34, 373–392.
- Piekielek, W.P., Fox, R.H., Toth, J.D., Macneal, K.E., 1995. Use of a chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency. *Agron. J.* 87, 403–408.
- Sansoulay, J., 2006. Transferts d'eau et des ions potassium et nitrate dans un sol à charges variables sous un couvert redistributeur de la pluie. Etude expérimentale et modélisation dans une bananeraie fertilisée sur andosol. Doctoral Thesis AgroParisTech, Paris, France, 160 pp.
- Shaffer, M.J., Wylie, B.K., Follett, R.F., Bartling, P.N.S., 1994. Using climate weather data with the NLeap model to manage soil nitrogen. *Agric. Forest Meteorol.* 69, 111–123.
- Sierra, G., Fontaine, S., Desfontaine, L., 2001. Factors controlling N mineralization, nitrification and nitrogen losses in an Oxisol amended with sewage sludge. *Aust. J. Soil Res.* 39, 519–534.
- Spaner, D., Todd, A.G., Navabi, A., McKenzie, D.B., Goonewardene, L.A., 2005. Can leaf chlorophyll measures at differing growth stages be used as an Indicator of winter wheat and spring barley nitrogen requirements in eastern Canada? *J. Agron. Crop Sci.* 191, 393–399.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *Eur. J. Agron.* 18, 289–307.
- Tixier, P., Malézieux, E., Dorel, M., 2004. SIMBA-POP: a cohort population model for long-term simulation of banana crop harvest. *Ecol. Model.* 180, 407–417.
- Tixier, P., 2004. Conception assistée par modèle de systèmes de cultures durables, application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Doctoral Thesis ENSAM, Montpellier, France, 233 pp.
- Thieuleux, L., 2006. Biodisponibilité de l'azote en culture bananière sur Nitisol. 2006. Application à la gestion de la fertilisation azotée. Doctoral Thesis Antilles-Guyane University, Pointe à Pitre, France, 105 pp.
- Twyford, I.T., Walmsley, D., 1974. The mineral composition of the robusta banana plant. IV. The application of fertilizers for high yields. *Plant Soil* 41, 493–508.

Azote minéralisable et statut organique des Andosols de Guadeloupe

Influence du milieu et des pratiques culturales

M. Dorel⁽¹⁾, K. Lombard⁽¹⁾ et R. Oliver⁽²⁾

(1) CIRAD-FLHOR, Station de Neufchâteau, 97130 Capesterre Belle-Eau - Guadeloupe

(2) CIRAD-AMIS, Avenue Agropolis, 34398 Montpellier Cedex 5

RÉSUMÉ

Les Andosols de Guadeloupe présentent des teneurs en matière organique très variables. Ces variations peuvent être liées à celles des conditions pédo-climatiques ou à l'effet des pratiques culturales. Dans un contexte où la limitation des pollutions d'origine agricole implique une réduction de la fertilisation azotée, les conséquences de ces variations sur la quantité d'azote minéralisable doivent être prises en compte pour évaluer la fertilité des sols et la durabilité des systèmes de cultures.

Après avoir étudié les variations du statut organique des Andosols sous bananeraie en relation avec la pluviométrie, l'intensité du caractère andique des sols et le mode de conduite de la culture, nous avons cherché à établir des relations entre la quantité d'azote minéralisable et le contenu des différents compartiments de la matière organique du sol (fractions granulométriques, biomasse microbienne). L'effet, sur ces paramètres, de l'introduction de la canne à sucre dans l'assolement des exploitations bananières a ensuite été évalué. Nous avons comparé pour ceci, sur une même exploitation, des parcelles sous monoculture bananière et des parcelles où ce système a été abandonné au profit de la rotation canne à sucre/ banane.

La teneur en matière organique des Andosols est fortement liée à la pluviométrie et à l'intensité du caractère andique qui est évalué par la rétention en eau à -1 500 kPa. La forte influence des conditions climatiques et édaphiques sur la teneur en carbone du sol et une localisation préférentielle des modes de conduite non mécanisés et peu intensifs dans les zones d'altitude soumises aux pluviométries les plus fortes rend l'effet des pratiques culturales sur la teneur en carbone du sol difficile à mettre en évidence. La quantité d'azote minéralisable apparaît sans relation avec la teneur en carbone organique total du sol mais est en revanche bien corrélée à la taille de la biomasse microbienne. Elle est nettement supérieure dans les bananeraies pérennes non mécanisées.

L'accroissement du rapport C/N de la matière organique du sol, du carbone contenu dans les fractions grossières et de la biomasse microbienne observé sous culture de canne à sucre semble lié à l'importante quantité de matière sèche apportée par les résidus de culture de canne à sucre. La faible teneur en azote des résidus de canne à sucre explique, qu'en dépit de l'accroissement de la biomasse microbienne, la quantité d'azote minéralisable n'augmente pas sous canne à sucre.

Mots clés

Andosol, matière organique, azote minéralisable, biomasse microbienne, pratiques culturales, bananeraie, canne à sucre

SUMMARY**MINÉRALISABLE NITROGEN AND ORGANIC STATUS OF ANDOSOLS IN GUADELOUPE****Climatic and edaphic determinants – Influence of soil management**

In Guadeloupe, andosols exhibit large variations in soil organic matter contents. Such a situation can be attributed to variations in climatic and edaphic conditions (figure 1) or to cultural practices. There is an increasing need to lessen the non intentional and detrimental effects of agriculture on the environment and to particularly reduce the use of nitrogen fertilisers. The influence of soil organic matter variations on the amount of mineralisable nitrogen must be taken into account to evaluate soil fertility and sustainability of the cropping systems. In the present study, we firstly analysed how soil organic matter status varies with annual rainfall and cultural practices. Secondly, we attempted to identify existing relations between the amount of mineralisable nitrogen and the content of the different soil organic matter pools (particle size fractions, microbial biomass). Then, the effects on the former parameters of sugarcane introduction in a banana cropping system was further investigated by comparing, on the same farm, plots of continuous banana monoculture and plots where banana monoculture has been replaced by sugarcane/banana rotation (table 1).

Soil organic carbon was found to be strongly linked to rainfall level and to soil andic character as evaluated by soil water content at -1 500 kPa (figure 3, figure 4). The strong influence of climate and edaphic conditions on soil organic carbon and the preferential location of no-till and weakly intensified cropping systems at the higher elevation sites make the effect of cultural practices on soil organic carbon difficult to establish clearly. There was no relationship between the amount of mineralisable nitrogen and the soil organic carbon contents in the studied soils. However the amount of mineralisable nitrogen was closely related to microbial biomass (table 3). Mineralisable nitrogen and microbial biomass were found higher under no-till perennial banana cropping systems (table 2, figure 5).

The increase of soil organic matter C/N ratio (figure 6), carbon content of coarse fractions (figure 7) and microbial biomass (figure 8) observed in sugarcane plots could result from the high quantity of crop residues returned to soil by sugar cane cultivation. The low nitrogen content of sugar cane residues (table 5) could explain why, despite the observed increase of microbial biomass, the amount of mineralisable nitrogen was not improved by sugarcane crop.

Key-words

Andosol, organic matter, mineralisable nitrogen, microbial biomass, cultural practices, banana plantation, sugar cane

RESUMEN**NITRÓGENO A MINERALIZAR Y ESTATUTO ORGÁNICO DE LOS ANDOSOLES DE GUADALUPE.****Influencia del medio y de las practicas de cultivo**

Los andosoles de Guadalupe presentan contenidos en materia orgánica muy variables. Estas variaciones pueden ser ligadas a las de las condiciones pedo- climáticas o al efecto de las practicas de cultivo. En un contexto donde la limitación de las contaminación de origen agrícola implica una reducción de la fertilización nitrogenada, las consecuencias de estas variaciones sobre la cantidad de nitrógeno a mineralizar deben ser tomadas en cuenta para evaluar la fertilidad de los suelos y la sostenibilidad de los sistemas de cultivos.

Después de haber estudiado las variaciones del estatuto orgánico de los andosoles bajo platanares en relación con las lluvias, la intensidad del carácter ándico de los suelos y el modo de manejo del cultivo, buscamos establecer relaciones entre la cantidad de nitrógeno a mineralizar y el contenido de los diferentes compartimentos de la materia orgánica del suelo (fracciones granulométricas, biomasa microbiana). Se evaluó el efecto sobre estos parámetros de la introducción de la caña de azúcar en la rotación de las explotaciones platane-ras. Comparamos para eso, sobre una misma explotación, parcelas con monocultivo de plátanos y parcelas donde este sistema fue abandonado al beneficio de la rotación caña de azúcar / plátano.

El contenido en materia orgánica de los andosoles es fuertemente ligado a las lluvias y a la intensidad del carácter ándico evaluado por la retención en agua a -1500 kPa. La fuerte influencia de las condiciones climáticas e edáficas sobre la tasa de carbono del suelo y una localización preferencial de los modos de manejo no mecanizados y poco intensivos en las zonas de altitud sometidas a lluvias más abundantes hacen que el efecto de las practicas de cultivos sobre el contenido en carbono del suelo es difícil ponerlo en evidencia. La cantidad de nitrógeno a mineralizar aparece sin relación con el contenido en carbono orgánico total del suelo pero es al contrario bien relacionado al tamaño de la biomasa microbiana. Es netamente superior en platanares perennes no mecanizados. El crecimiento de la relación C/N de la materia orgánica del suelo, del carbono contenido en las fracciones gruesas y de la biomasa microbiana observada en cultivo de caña de azúcar parece ligado a la importante cantidad de materia seca aportada por los residuos de cultivo de caña de azúcar. La pequeña tasa en nitrógeno de los residuos de caña de azúcar explica, que mientras el crecimiento de la biomasa microbiana, la cantidad de nitrógeno a mineralizar no aumenta bajo caña de azúcar.

Palabras clave

Andosol, materia orgánica, nitrógeno a mineralizar, biomasa microbiana, practicas de cultivos, platanares, caña de azúcar.

La matière organique est reconnue comme le principal indicateur de la qualité et de la fertilité du sol. (Robert, 2002). La matière organique du sol joue en effet de nombreux rôles. Elle constitue d'abord un substrat carboné, source d'énergie pour les micro-organismes du sol. En se minéralisant, elle fournit ensuite aux plantes des éléments nutritifs et notamment de l'azote. Elle génère une grande partie des propriétés d'échange et d'adsorption du sol qui conditionnent la disponibilité des éléments minéraux, les équilibres cationiques et l'efficacité des engrais. La matière organique joue également un rôle primordial au niveau de l'agrégation des constituants du sol, de la stabilité de la structure et des propriétés physiques qui en découlent (porosité, conductivité hydraulique, résistance mécanique, aération...).

Les bananeraies de Guadeloupe sont situées majoritairement sur des sols volcaniques appartenant à la classe des Andosols. La teneur en matière organique de ces sols peut atteindre des niveaux très élevés. Cependant, une fraction importante de la matière organique des Andosols est considérée comme difficilement minéralisable (Quantin, 1972; Shoji *et al.*, 1993) car elle forme des associations très stables avec les constituants minéraux non cristallins. En conséquence, le rapport entre l'azote total du sol et la quantité d'azote potentiellement minéralisable est plus faible dans les Andosols que dans les sols dépourvus de caractère andique (Dahlgren *et al.*, 2004).

En Guadeloupe, la banane est principalement produite dans le cadre de systèmes monoculturels. Il existe toutefois divers degrés d'intensification, allant de la culture pérenne non mécanisée conduite avec un minimum d'intrants à une monoculture intensive mécanisée où les parcelles sont labourées et replantées régulièrement. La pratique d'une monoculture associant une utilisation massive d'intrants chimiques et une mécanisation lourde génère des dégradations de la fertilité du sol et constitue une menace pour l'environnement (Dorel, 1993; Dorel, 2001; Bonan et Prime, 2001; Cabidoche *et al.*, 2001).

De nouveaux systèmes de culture bananiers, reposant sur la pratique de rotations culturales, principalement avec la canne à sucre, se développent depuis peu en Guadeloupe. Ces nouveaux systèmes permettent, en limitant le développement des populations de parasites inféodés au bananier, de réduire l'utilisation des pesticides. L'évaluation de la durabilité de ces nouveaux systèmes de culture implique de prévoir l'évolution des différentes composantes de la fertilité des sols. La quantité d'azote potentiellement minéralisable constitue un critère d'évaluation de la fertilité du sol à prendre en considération dans un contexte général où la limitation des pollutions d'origine agricole impose une réduction des quantités d'engrais azotés appliquées sur les cultures.

Nous étudierons d'abord, sous monoculture bananière, l'influence des conditions pédo-climatiques et du mode de conduite de la culture sur le statut organique du sol. Nous essaierons d'établir des relations entre la quantité d'azote minéralisable et l'importance des différents compartiments de la matière organique du sol. Nous nous intéresserons notamment à la biomasse microbienne, com-

partiment actif dont le rôle central au niveau de la minéralisation de l'azote a été démontré (Chaussod et Houot, 1993), et à la matière organique associée aux différentes fractions granulométriques du sol.

Nous évaluerons ensuite l'effet de l'introduction de la canne à sucre dans un système de culture bananier intensif mécanisé sur ces descripteurs du statut organique et de l'activité biologique du sol.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Présentation des sols

Les Andosols sont situés en Guadeloupe dans la partie sud de la Basse-Terre. La classification régionale des Andosols, proposée par Colmet-Daage et Lagache (1965) repose, en majeure partie, sur des critères physiques (porosité, rétention en eau du sol) traduisant l'intensité du caractère andique (teneur en minéraux non cristallins fortement hydratés). Celui-ci varie, sur les deux versants de l'île, avec l'altitude et la pluviométrie (figure 1).

Aux altitudes les plus élevées, sous des pluviométries moyennes annuelles comprises entre 4 000 et 6 000 mm, on observe des Andosols perhydratés à porosité importante et forte rétention en eau (humidité pondérale à la capacité au champ supérieure à 100 %). Aux altitudes moyennes et sous une pluviométrie comprise entre 3 000 et 4 000 mm par an, les Andosols présentent une porosité et une rétention en eau plus faible (humidité pondérale à la capacité au champ comprise entre 70 et 100 %). En bas de versant, sous des pluviométries annuelles inférieures à 3 000 mm, le caractère andique du sol s'estompe progressivement et on passe des Andosols aux Sols Brun Andiques puis aux Sols Brun-Rouille à halloysite.

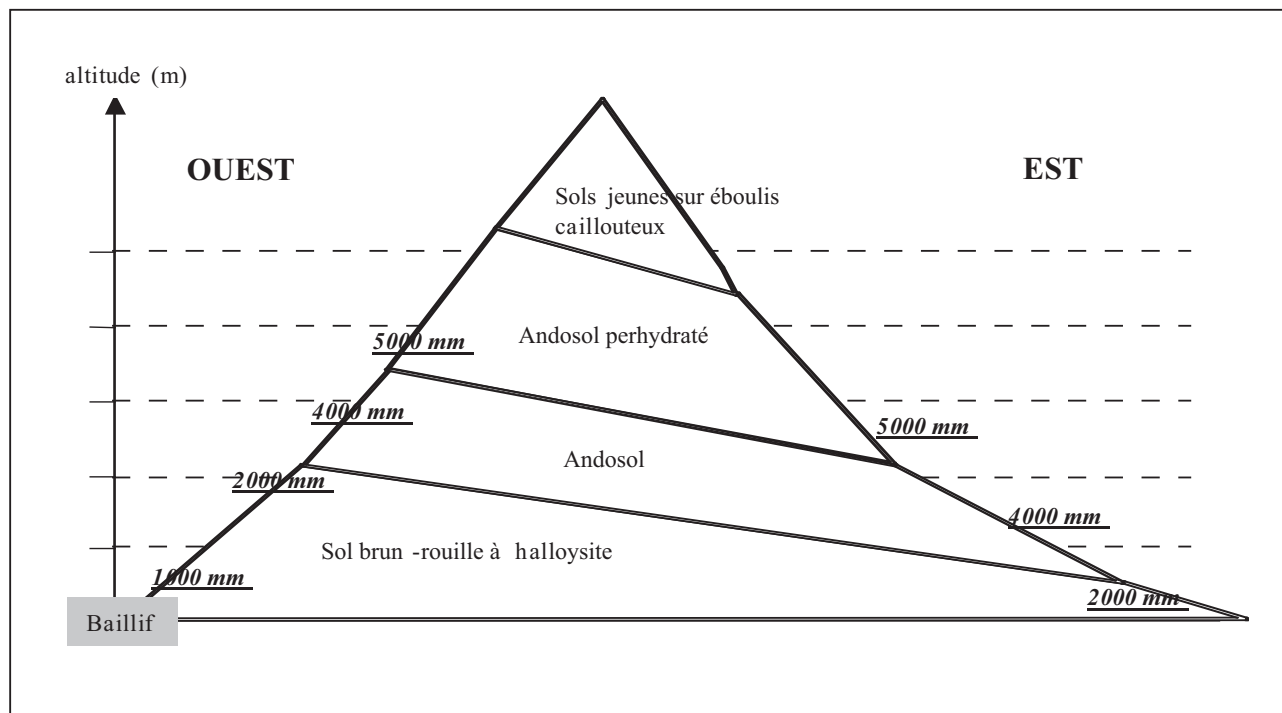
Sur ce type de climoséquence, la pluviométrie détermine la nature des minéraux secondaires. Sous les pluviométries les plus fortes, le lessivage intense de la silice et des bases conduit à la formation de minéraux non cristallins (allophanes) et de complexes humus-Al (Mizota et van Reeuwijk, 1989; Chadwick *et al.*, 2003). Lorsque la pluviométrie diminue, l'augmentation de la disponibilité de la silice et le dessèchement temporaire du sol favorisent la formation de minéraux argileux 1:1 tels que l'halloysite (Parfitt *et al.*, 1983; Dahlgren *et al.*, 2004).

Mode de conduite des bananeraies

En Guadeloupe, le mode de conduite des bananeraies traduit généralement les contraintes du milieu. Les bananeraies du versant Ouest de la Basse-terre sont situées sur des terres souvent très pentues et à forte pierrosité. Un mode de conduite traditionnelle avec un faible niveau d'intensification de la culture (absence de mécanisation, replantations très peu fréquentes) domine dans cette zone de production. Les applications de pesticides sont rares, le parasi-

Figure 1 - Distribution des sols et de la pluviométrie dans le sud de la Basse-Terre. D'après Colmet-Daage (1969) et Chaperon *et al.* (1985). Les chiffres soulignés correspondent à la pluviométrie moyenne annuelle

Figure 1 - Soil and rainfall distribution in the southern part of the island Basse-Terre. Adapted from Colmet-Daage (1969) and Chaperon *et al.* (1985). Underlined numbers express Mean Annual Rainfall



tisme se maintenant à des niveaux modérés sans recours à la lutte chimique. Sur le versant Est, les bananeraies sont situées en majeure partie sur une zone de piémont où les terres, en pente douce et présentant une pierrosité faible, sont favorables à la mécanisation. Le mode de conduite des bananeraies est basé sur des replantations périodiques visant à homogénéiser le peuplement végétal. Ces replantations sont effectuées après une destruction de l'ancienne bananeraie à l'aide d'engins lourds et un décompactage profond du sol (Dorel, 2001). On observe également des bananeraies dans la partie supérieure du versant Est (altitude supérieure à 300 m), où les pentes étant nettement plus fortes, la bananeraie pérenne non mécanisée redevient le mode de conduite dominant. On observe entre les 2 modes de conduite extrêmes (bananeraie mécanisée et replantées régulièrement / bananeraie pérenne non mécanisée) des modes de conduite intermédiaires où le recours à la mécanisation et les replantations ne sont pas systématiques.

Dispositifs expérimentaux

- Une enquête agronomique a tout d'abord été entreprise en 2003 afin d'évaluer l'effet du mode de conduite de la bananeraie sur la fertilité des sols. Cette enquête a été conduite sur un échantillon A de 50 parcelles couvrant la gamme de variation en altitude et la diversité des modes de conduite des bananeraies en monoculture sur

Andosols dans le Sud de la Basse Terre. Nous ne présenterons ici que les résultats concernant les teneurs en matière organique du sol.

- Une étude plus précise du statut organique du sol a ensuite été réalisée sur douze parcelles représentatives de 3 modes de conduite types identifiés au cours de l'enquête précédente :

- mode de conduite BM : bananeraie intensive mécanisée replantée tous les 5 ans recevant des apports mensuels d'engrais et des applications régulières de pesticides (2 à 3 applications de nématicides- insecticides et 4 à 6 applications d'herbicides par an).

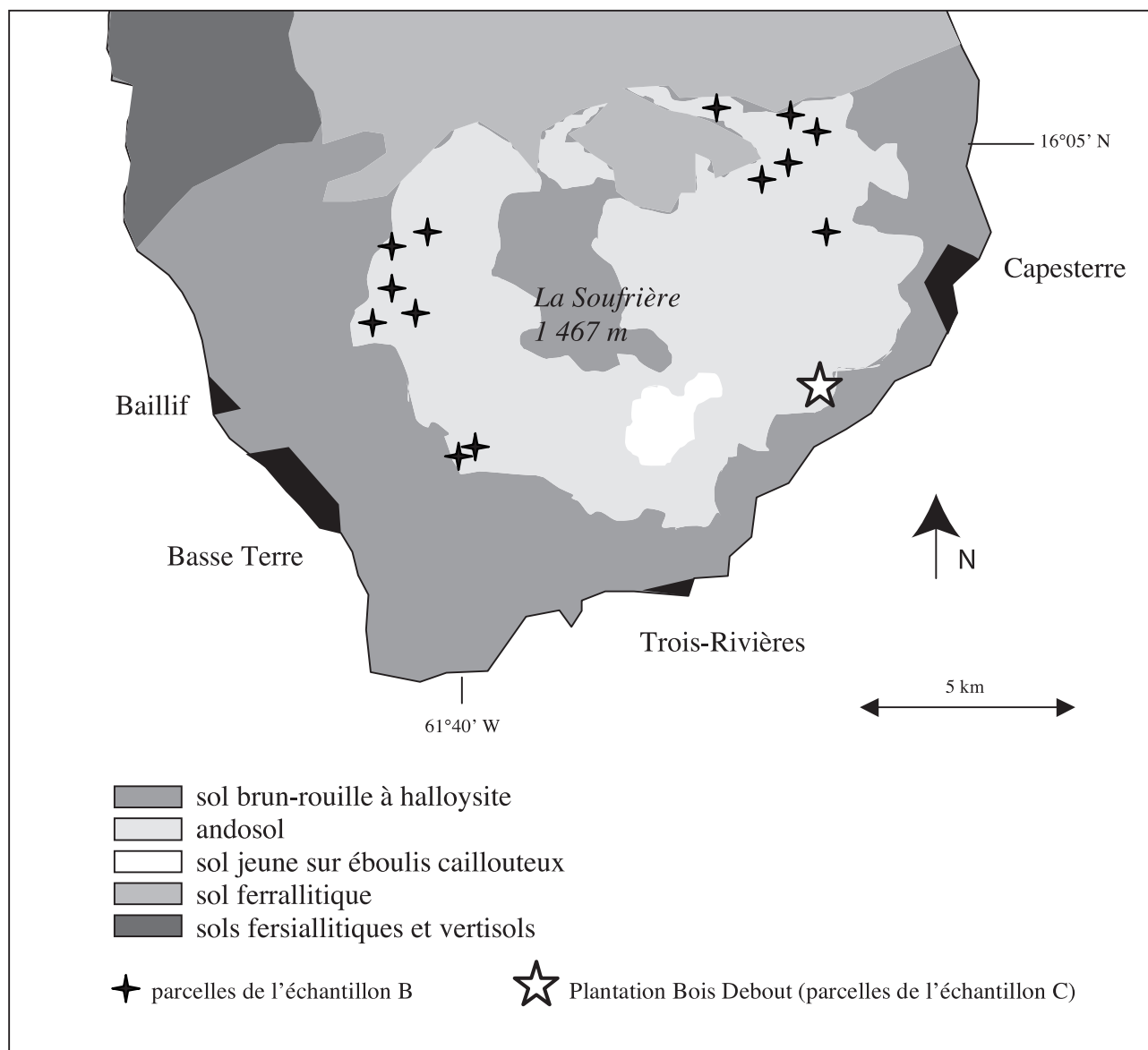
- mode de conduite BP : bananeraie pérenne non mécanisée (en place depuis plus de 15 ans) conduite avec un minimum d'intrants chimiques (3 à 5 applications d'engrais et 2 à 3 applications d'herbicides par an).

- mode de conduite BI : mode de conduite intermédiaire dérivé de BM. Les replantations et le travail du sol ne sont pas effectués régulièrement et les applications d'engrais et pesticides ne sont pas systématiques.

Pour chaque mode de conduite 4 parcelles ont été sélectionnées sur des Andosols du sud de la Basse-Terre (figure 2) s'étageant entre 400 et 700 m sur le versant Ouest et entre 150 et 450 m sur le versant Est. Cette répartition altitudinale correspond

Figure 2 - Localisation des parcelles étudiées sur une carte simplifiée des sols du Sud de la Basse-Terre (d'après Colmet-Daage, 1969)

Figure 2 - Location of the experimental plots on a simplified soil map of the southern part of the island Basse-terre (Colmet-Daage, 1969)



sur les 2 versants à une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 3 000 et 5 000 mm.

Ces douze parcelles ont constitué l'échantillon B.

- L'effet de l'introduction de la canne à sucre dans les systèmes de culture bananiers est étudié sur un échantillon C de parcelles situées sur une exploitation du versant Est de la Basse Terre (Plantation Bois Debout) à une altitude comprise entre 100 et 160 m (figure 2). Sur cette exploitation, le système de monoculture bananière mécanisée avec replantations tous les 5 ans (système BM) est

abandonné progressivement au profit de rotation banane / canne à sucre. L'échantillon C comprend 12 parcelles représentatives des différents états de ces deux systèmes de culture (tableau 1).

Pluviométrie

La pluviométrie augmente régulièrement avec l'altitude sur les deux versants de la Basse-Terre (figure 1). La relation altitude / pluviométrie est cependant différente entre le versant Est, exposé directement aux alizés, et le versant Ouest soumis à un effet de foehn

Tableau 1 - Caractéristiques des parcelles de l'échantillon C**Table 1** - Characteristics of the plots of the C sample

Culture en cours	Historique culturel	Nombre de parcelles
Banane (2 ^e cycle de culture)	Plantation après 3 années de culture de canne à sucre succédant à 30 ans de monoculture bananière	2
Banane (2 ^e cycle de culture)	Monoculture bananière depuis plus de 30 ans	4
Canne à sucre (2 ^e cycle de culture)	Plantation après plus de 30 années de monoculture bananière.	6

Une pluviométrie moyenne annuelle a été calculée pour chaque parcelle étudiée à partir de son altitude en utilisant un gradient d'augmentation de la pluviométrie avec l'altitude, déterminé, pour chaque versant de la Basse-Terre, à partir les données fournies par les différents pluviomètres présents dans le Sud de la Basse-terre (Chaperon *et al.*, 1985).

Mesures

Parcelles des échantillons A

Sur un échantillon composite constitué à partir de 30 carottes de terre prélevées à la tarière dans l'horizon 0-20 cm, la teneur en carbone et en azote organique est déterminée par combustion sèche.

Parcelles de l'échantillon B

Mesure de la teneur en eau à un potentiel hydrique de -1500 kPa

Cette mesure peut être utilisée comme un indicateur de la teneur en allophane (Dorel, 2001) et de l'intensité du caractère andique du sol (Shoji *et al.*, 1996; Colmet-Daage et Lagache, 1965). La mesure de la teneur en eau est effectuée sur dix mottes prélevées dans l'horizon 0-20 cm après fixation du potentiel hydrique grâce à une presse à plaque de céramique poreuse (Richards, 1941).

Parcelles des échantillons B et C

Sur un échantillon composite constitué de 30 carottes prélevées à la tarière dans l'horizon 0-20 cm en juin 2004 :

- mesure de la teneur en carbone et en azote organique des fractions granulométriques 2 mm-200 microns, 200-50 microns, 50-0 microns obtenues par tamisage après agitation dans l'eau en présence de billes de verre et traitement à l'hexamétaphosphate de sodium (Feller et Beare, 1997) ;
- mesure la biomasse microbienne déterminée après fumigation au chloroforme par dosage colorimétrique de l' $N-\alpha$ aminé extrait au KCl molaire (Amato et Ladd, 1988). Le carbone de la biomasse microbienne est évalué à partir de la quantité d' N alpha-aminé (C microbien = N alpha-aminé $\times 21$) ;
- mesure de la quantité d'azote minéralisé après 7 jours d'incu-

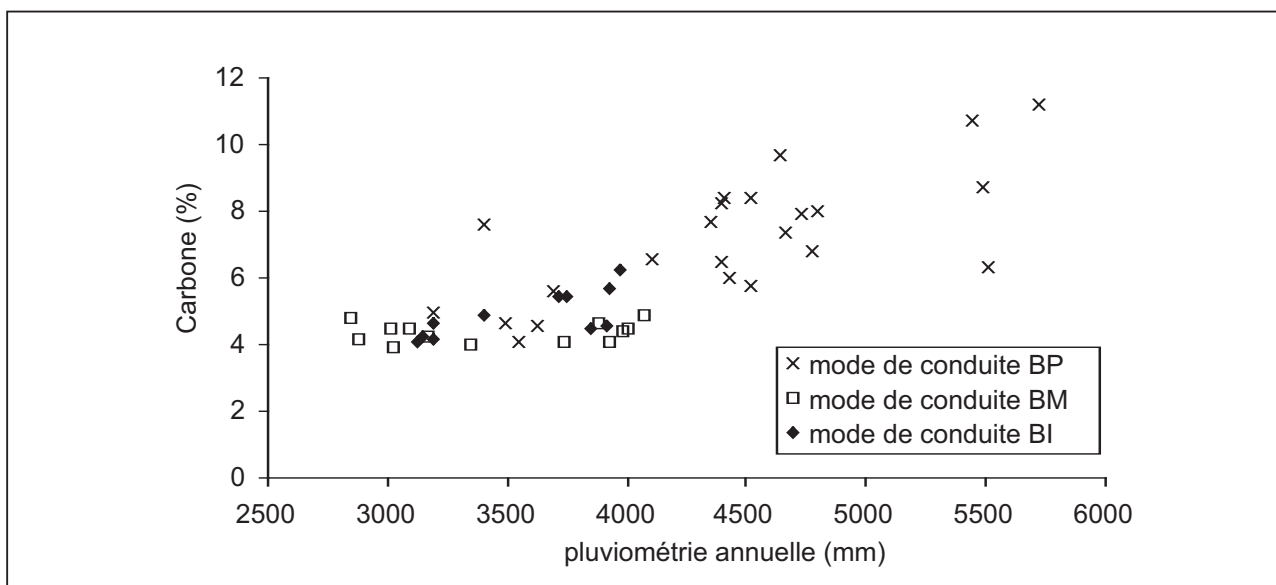
bation du sol en condition d'anaérobiose à 40 °C (méthode Waring-Bremner, 1964).

RÉSULTATS

Variations des teneurs en carbone organique des Andosols sous bananeraie

Les variations de la teneur en carbone en fonction de la pluviométrie moyenne annuelle des parcelles de l'échantillon A sont présentées sur la *figure 3*. On observe une corrélation entre la teneur en carbone et la pluviométrie ($r^2 = 0,64$; $P < 0,01$) Les bananeraies pérennes (BP) présentent les teneurs en carbone les plus fortes mais constituent le mode de conduite dominant dans les zones à forte pluviométrie où les bananeraies mécanisées BM sont absentes. Si l'on restreint l'analyse à la tranche pluviométrique où les 3 modes de conduite sont représentés de manière égale (pluviométrie comprise entre 3000 et 4000 mm an⁻¹), les teneurs en carbone les plus fortes s'observent pour des bananeraies de type BP et BI mais on relève des teneurs en carbone faibles pour les 3 modes de conduite.

Les *figures 4 a et b* présentent les variations de la teneur en carbone en fonction de la pluviométrie annuelle et de la teneur en eau à -1500 kPa pour les 12 parcelles de l'échantillon B. La teneur en carbone du sol apparaît comme précédemment étroitement liée à la pluviométrie ($r^2 = 0,77$; $P < 0,01$). Elle est également bien corrélée à la teneur en eau à -1500 kPa ($r^2 = 0,80$; $P < 0,01$) qui est une mesure de l'hydratation du matériau nous permettant d'évaluer l'intensité du caractère andique. Sur cet échantillon B, les teneurs en carbone les plus fortes s'observent de nouveau sur des parcelles de type BP ou BI qui se caractérisent également par des pluviométries et des teneurs en eau à -1500 kPa les plus fortes. Dans la tranche pluviométrique et de teneur en eau où les 3 modes de conduite sont représentés (pluviométrie 3000 à 4000 mm an⁻¹; teneur en eau 0,25 à 0,4 g g⁻¹), même si les bananeraies de type BM tendent à présenter des teneurs en carbone plus faibles, il est difficile de dégager un effet net du mode de conduite de la bananeraie.

Figure 3 - Variations des teneurs en carbone du sol des parcelles de l'échantillon A en fonction de la pluviométrie (couche 0-20 cm)**Figure 3** - Soil carbon content (0-20cm layer) as a function of mean annual rainfall for the plots of the A sample

Variations des quantités d'azote minéralisable des Andosols sous bananeraie - Relations avec les différents compartiments de la matière organique du sol

On observe au *tableau 2* les quantités d'azote minéralisable dans les parcelles de l'échantillon B pour les différents modes de conduite de la bananeraie. Celles-ci diminuent nettement lorsque l'on passe des bananeraies mécanisées BP aux bananeraies BI puis aux bananeraies pérennes BM (BP > BI > BM).

Les corrélations entre l'azote minéralisable et différentes variables caractérisant les différents compartiments de la matière organique du sol sont présentées au *tableau 3*.

Il n'existe aucune corrélation entre l'azote minéralisable et le carbone organique total du sol. Les corrélations avec le carbone organique contenu dans les différentes fractions granulométriques du sol augmentent lorsque l'on passe des fractions grossières aux fractions moyennes puis aux fractions fines. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Feller (1994) montrant que, sur des sols tropicaux riches en minéraux secondaires fins, la matière organique associée aux fractions granulométriques fines constitue la principale source d'azote minéralisable.

La variable la plus fortement corrélée à l'azote minéralisable est le carbone microbien ($r^2 = 0,80$).

Chaussod et Houot (1993) ont également montré que, pour un type de sol donné, la quantité d'azote minéralisable était proportionnel à la taille de la biomasse microbienne.

La relation entre ces deux variables est présentée à la *figure 5*.

Tableau 2 - Azote minéralisable des parcelles de l'échantillon B (mg d'azote kg⁻¹ de sol)**Table 2** - Mineralisable nitrogen of the 0-20 cm layer for the plots of the B sample

	BP	BI	BM
	n = 4	n = 4	n = 4
Moyenne	8,25	4,46	2,45
Mini	6,52	3,43	1,90
Maxi	9,78	6,63	3,18

Tableau 3 - Corrélations entre l'azote minéralisable et le carbone organique de différents compartiments du sol des parcelles de l'échantillon B)**Table 3** - Correlations between the mineralisable nitrogen and the carbon content of the different soil pools for the plots of the B sample

n = 12	r ²	P
Carbone total	0,006	0,81
Carbone de la fraction grossière (2mm-200 µm)	0,30	0,06
Carbone de la fraction moyenne (200-50 µm)	0,43	0,02
Carbone de la fraction fine (50-0 µm)	0,53	< 0,01
Carbone de la biomasse microbienne	0,80	< 0,01

Figure 4a - Variation des teneurs en carbone du sol en fonction de la pluviométrie des parcelles de l'échantillon B (couche 0-20 cm)

Figure 4a - Soil carbon content (0-20 cm layer) as a function of mean annual rainfall for the plots of the B sample

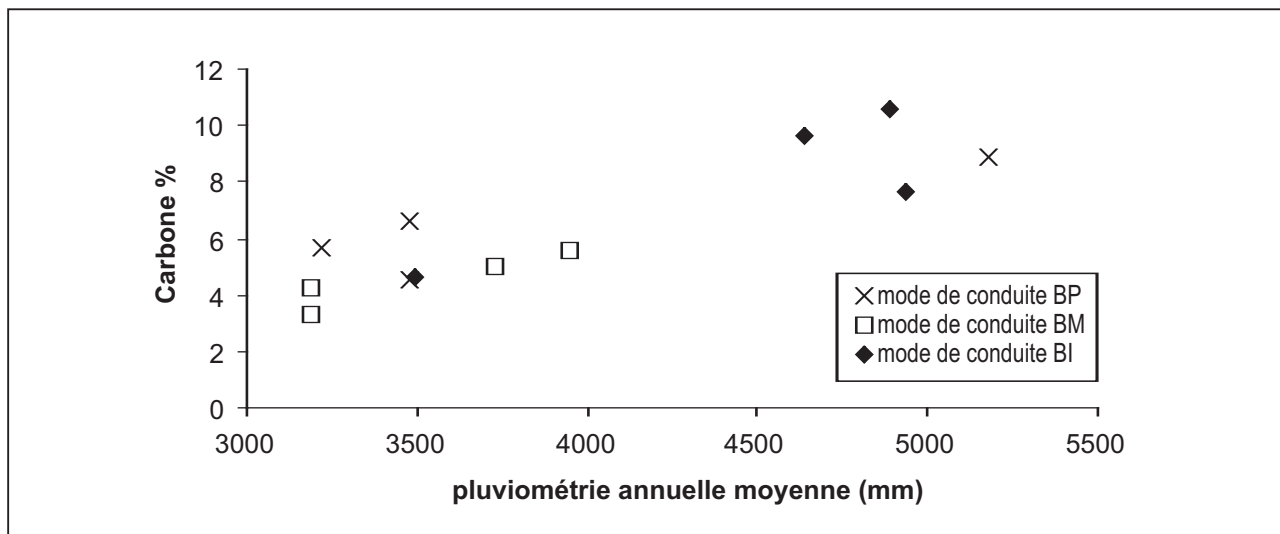


Figure 4b - Variation des teneurs en carbone du sol en fonction de la teneur en eau à -1500 kPa des parcelles de l'échantillon B (couche 0-20 cm)

Figure 4b - Soil carbon content (0-20 cm layer) as a function of soil water content at -1500 kPa for the plots of the B sample

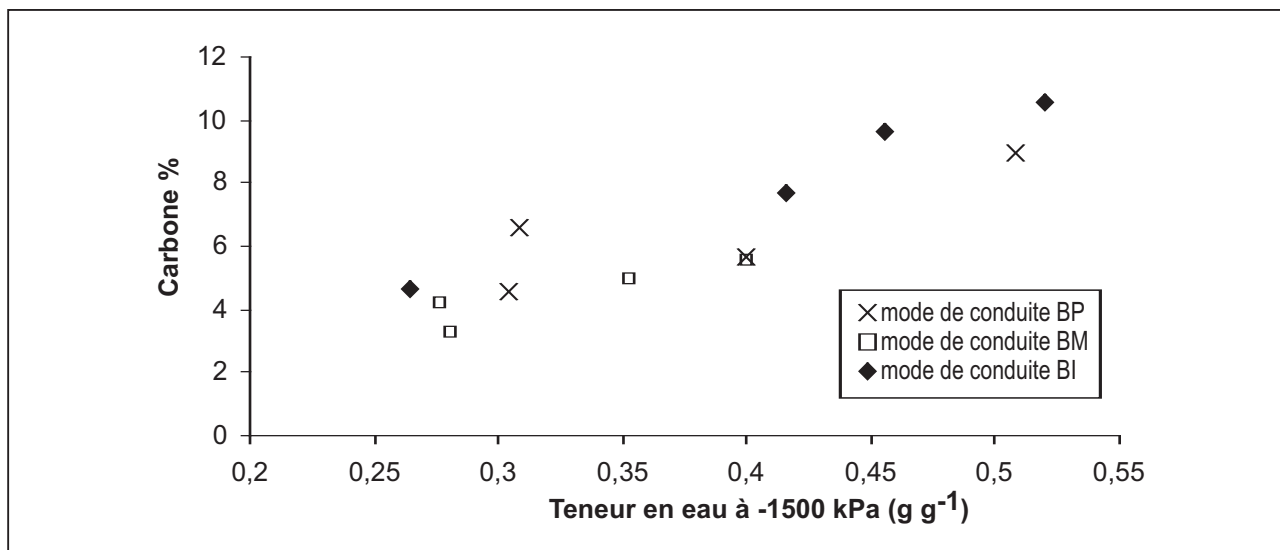


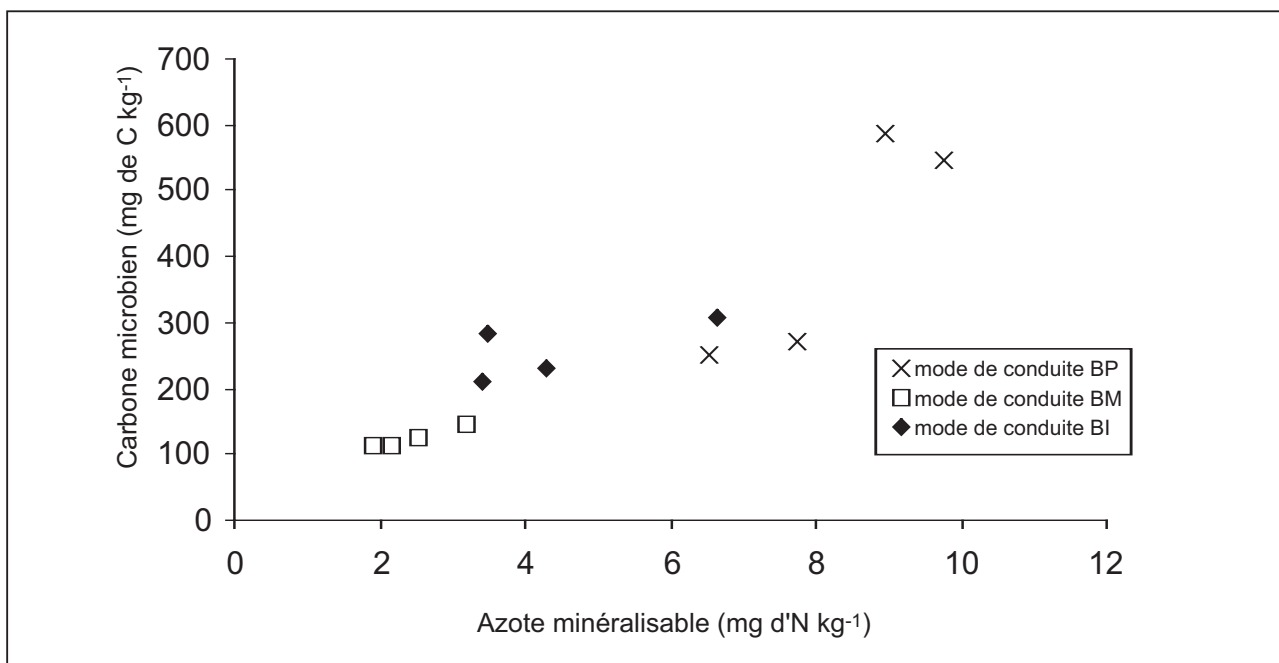
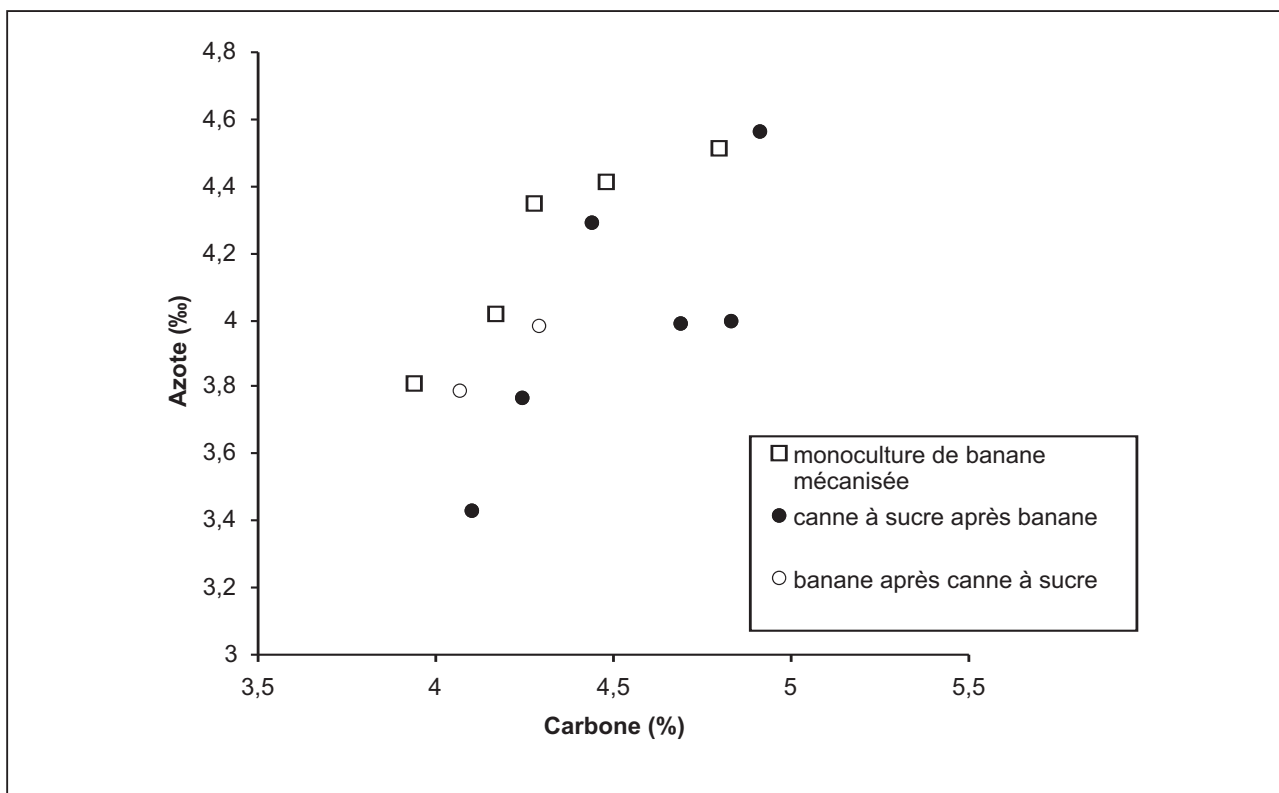
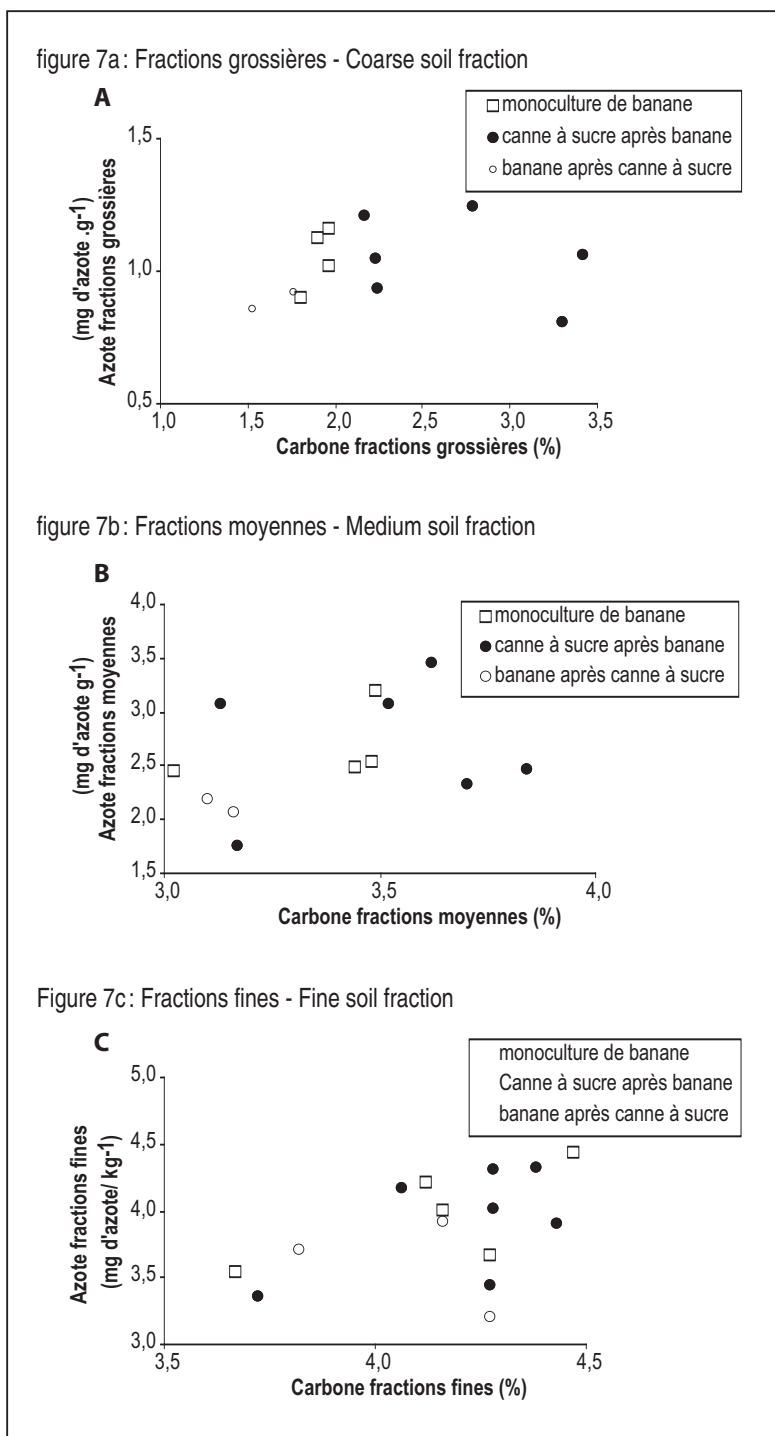
Figure 5 - Azote minéralisable et biomasse microbienne du sol des parcelles de l'échantillon B (couche 0-20 cm)**Figure 5** - Soil mineralisable nitrogen as a function of soil microbial biomass for the plots of the B sample.**Figure 6** - Carbone et azote total du sol des parcelles de l'échantillon C**Figure 6** - Total soil carbon and soil nitrogen content for the plots of the C sample

Figure 7 - Teneurs en carbone et azote minéralisable des sols des parcelles de l'échantillon C

Figure 7 - Carbon and nitrogen contents for the plots of the C sample



Les plus fortes quantités d'azote minéralisable mesurées dans les sols des bananeraies de type BP et BI s'accompagnent de quantité de carbone microbien également plus élevées.

Effet de l'introduction de la canne à sucre dans les systèmes de culture bananiers sur le statut organique et la quantité d'azote minéralisable du sol

- Les teneurs en carbone et en azote total de l'horizon 0-20 cm des parcelles de l'échantillon C ne varient pas de manière nette avec le système de culture (figure 6). En revanche, pour une teneur en azote donnée, les parcelles en canne à sucre présente une teneur en carbone et donc un rapport C/N significativement plus élevé que les parcelles en culture bananière (Test de Fisher, $Pr > F = 0,01$).

- La proportion moyenne des différentes fractions granulométriques dans la couche 0-20 cm est présentée pour chaque système de culture de l'échantillon C. (tableau 4)

On n'observe pas d'effet du système de culture sur la proportion des différentes fractions granulométriques.

Les teneurs en carbone et en azote total des différentes fractions granulométriques du sol des parcelles de l'échantillon C sont présentées sur les figures 7 a, b, c.

L'effet des systèmes de culture sur le carbone et l'azote des fractions fines et moyennes n'apparaît pas clairement.

Les fractions grossières du sol des parcelles en canne à sucre se distinguent par contre nettement avec des teneurs en carbone plus élevées que celles des parcelles en monoculture de banane ou sous culture de banane après canne à sucre. Les teneurs en azote étant équivalentes dans les différents systèmes de culture, le sol des parcelles en canne à sucre présente un rapport C/N dans la fraction grossière significativement plus élevé (Test de Fisher, $Pr > F = 0,01$).

- La biomasse microbienne et l'azote minéralisable de l'horizon 0-20 cm de chacune des parcelles étudiées sont présentées sur la figure 8. Les parcelles en canne à sucre présentent des biomasses microbiennes supérieures à celles des parcelles de banane, que celles-ci soient en monoculture ou plantées après une culture de canne à

Tableau 4 - Proportion moyenne des différentes fractions granulométriques dans la couche 0-20 cm pour chaque système de culture de l'échantillon C.**Table 4** - Mean particle-size distribution in the 0-20 cm layer for the different cropping system of the C sample.

	Fraction grossière (2 mm-200 µm) %	Fraction moyenne (200 µm-50 µm) %	Fraction fine < 50 µm %
Monoculture banane	5 0,4*	21 3,8*	72 3,5*
Canne à sucre après banane	5 0,5*	17 4*	76 3,9*
Banane après canne à sucre	5 1,1*	18 0,4*	75 1,4*

* écart-type

sucre (Test de Fisher, $Pr > F = 0,001$). Par contre, bien que l'on observe encore une fois une bonne corrélation entre la biomasse microbienne et l'azote minéralisable, les quantités d'azote minéralisable des parcelles en canne à sucre ne sont pas significativement supérieures à celles des parcelles sous culture bananière.

DISCUSSION

L'augmentation des teneurs en carbone dans les sols d'altitude soumis à une forte pluviométrie peut s'expliquer par un ralentissement de la minéralisation de la matière organique (températures plus fraîches, pluviométrie plus forte maintenant les sols à une humidité proche de la saturation). Elle est également liée au fait que les fortes pluviométries génèrent des conditions propices à la formation de minéraux secondaires non cristallins (allophanes) et de complexes humus-Al qui favorisent la conservation de la matière organique en la protégeant de la dégradation par les micro-organismes (Powers et Schlesinger, 2002; Mikuta *et al.*, 2005; Sollins *et al.*, 1996).

Des travaux précédents réalisés sur les Andosols de Guadeloupe ont montré un effet négatif du travail du sol sur la teneur en matière organique des sols de bananeraies :

- A partir d'une approche de type enquête, Clermont-Dauphin *et al.* (2004) ont observé une diminution du stock de carbone sous l'effet du travail du sol.

- En conditions expérimentales, Dorel (1993) a montré qu'un labour profond à la charrue à soc provoquait une dilution de la matière organique dans la couche travaillée induisant une diminution de la teneur en carbone des horizons de surface.

La mise en évidence d'un tel effet est cependant, à partir de nos résultats, plus délicate. Les raisons en sont les suivantes :

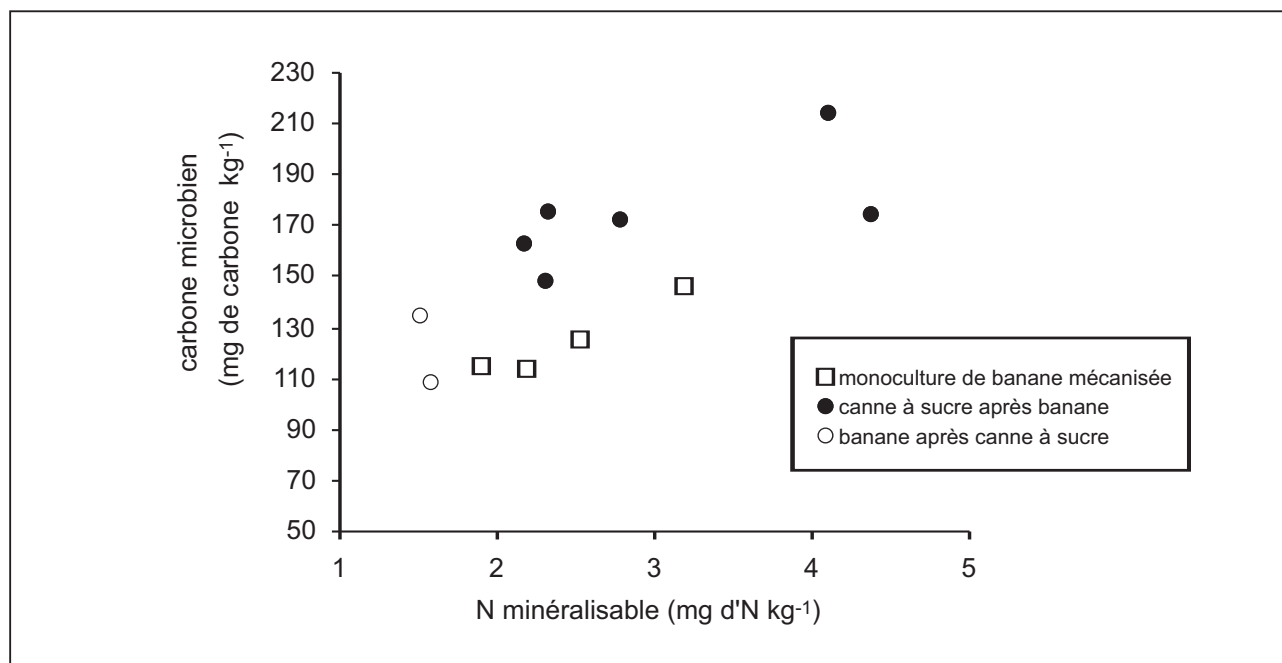
- Les bananeraies pérennes étant situées dans des zones montagneuses et les bananeraies mécanisées dans des zones de plaine, il est difficile de séparer l'effet des conditions climatiques et édaphiques de celui des pratiques culturales.

- Lors de la replantation des bananeraies, l'enfouissement de la matière organique est effectué à l'aide d'un pulvérisateur à disques qui opère sur une profondeur limitée (15-20 cm). Un décompactage du sol est ensuite effectué plus profondément (60 cm) mais avec un outil à dents (sous-soleuse) qui ne provoque pas de mélange des différents horizons du profil cultural (Dorel, 1993). Ce type de préparation des sols n'entraîne donc pas de dilution de la matière organique contenue dans la couche 0-20 cm.

- L'augmentation de l'accessibilité de la matière organique aux micro-organismes liée à la fragmentation des agrégats par le travail du sol entraîne une minéralisation plus rapide qui est présentée comme un des principaux facteurs expliquant la diminution du stock en matière organique des sols travaillés (Sollins *et al.*, 1996). Dans notre cas, la fragmentation des agrégats élémentaires par le travail du sol est certainement limitée en raison de la très forte stabilité structurale des Andosols (Dahlgren *et al.*, 2004), d'où un effet peu marqué du travail du sol sur la teneur en matière organique du sol.

La quantité d'azote minéralisable, qui conditionne l'aptitude du sol à produire avec une fertilisation azotée minimale, n'apparaît pas liée à la teneur en matière organique du sol. Ceci pourrait être lié à une augmentation simultanée, sur la climoséquence étudiée, de la teneur en minéraux non cristallins et de la teneur en matière organique. L'allophane et l'aluminium amorphe ont en effet un rôle inhibiteur sur la minéralisation du carbone et de l'azote organique (Boudot *et al.*, 1988; Saggar *et al.*, 1994) qui expliquerait que la quantité d'azote minéralisable ne soit pas proportionnelle à la teneur en matière organique du sol.

La quantité d'azote minéralisable est par contre fortement corrélée à la biomasse microbienne (*figure 8*) qui ne représente qu'une fraction faible (1 à 5 %) de la matière organique du sol (Sparling, 1997). La quantité d'azote minéralisable et la biomasse microbienne sont plus importantes dans les sols des bananeraies pérennes non mécanisées recevant de faibles quantités d'engrais et de pesticides. D'après Chaussod *et al.*, (1992), la biomasse microbienne est un compartiment de la matière organique du sol actif, à renou-

Figure 8 - Azote minéralisable et biomasse microbienne du sol des parcelles de l'échantillon C**Figure 8** - Soil mineralisable nitrogen as a function of soil microbial biomass for the plots of the C sample**Tableau 5** - Composition des résidus de culture de banane et de canne à sucre)**Table 5** - Contents of banana and sugar cane crop residues

Résidus de culture	Banane*	Canne à sucre**
Matière sèche (t ha ⁻¹)	11	19
N (kg ha ⁻¹)	140	91

* d'après Khamsouk (2001)

** d'après Pouzet et al., (2002)

vement rapide, particulièrement sensible à l'effet des pratiques culturales. Dans les situations étudiées ici, il est difficile d'identifier précisément les pratiques à l'origine de cette meilleure activité biologique du sol. Il semble cependant que, dans le cas des bananeraies pérennes, l'absence de travail du sol et le maintien d'une litière permanente de résidus végétaux à la surface du sol soient des pratiques plus favorables à l'activité biologique du sol (Carter, 1991 ; Angers et al, 1993) que les travaux du sol effectués lors des replantations dans les bananeraies mécanisées. Lors des replantations, l'ancienne bananeraie est détruite par des passages répétés, souvent en conditions très humides, de pulvérisateurs à disques lourds qui créent, à faible profondeur, des zones compactes à conductivité hydraulique réduite (Dorel, 2001).

L'introduction de la canne à sucre dans les systèmes de cultu-

re bananiers ne semble pas augmenter la teneur en carbone organique de la couche 0-20 cm. Cette culture augmente par contre le rapport C/N de la matière organique du sol, la teneur en carbone des fractions granulométriques grossières et la biomasse microbienne. Elle ne provoque pas d'augmentation de la quantité d'azote minéralisable. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les résidus de culture de canne à sucre apportent plus de matière sèche mais moins d'azote que les résidus de culture de banane (tableau 5).

La biomasse microbienne et la matière organique de la fraction granulométrique grossière constituent deux compartiments susceptibles de traduire, à court terme, les variations quantitatives ou qualitatives des restitutions organiques. Les résidus de culture enrichissent en effet rapidement, sous forme de débris végétaux, la fraction grossière (Feller, 1994). Ils influent simultanément sur la taille de la biomasse microbienne en augmentant la source de substrat carboné disponible (Chaussod, 1996). Lorsque les parcelles de canne à sucre retournent à la culture bananière, ces deux compartiments retrouvent un niveau voisin de celui observé sur les parcelles en monoculture bananière.

CONCLUSIONS

Nos résultats montrent que la teneur en matière organique des Andosols sous bananeraie est fortement liée à la pluviométrie. Sur la climoséquence étudiée, la pluviométrie détermine également l'intensité du caractère andique du sol (teneur en minéraux secondaires

non cristallins). Dans ces conditions, l'évaluation de l'effet du mode de conduite de la culture sur la teneur en matière organique est délicate et doit être faite en tenant compte de la forte variabilité sur de courtes distances des conditions climatiques et édaphiques.

La quantité d'azote minéralisable n'est pas liée à la teneur en carbone du sol mais à la taille de la biomasse microbienne. Elle varie fortement en fonction du mode de conduite des bananeraies, le sol des bananeraies pérennes non mécanisées et peu intensifiées présentant des biomasses microbiennes et des quantités d'azote minéralisable les plus fortes.

Dans les sols de bananeraie étudiés, la biomasse microbienne constitue un compartiment de la matière organique du sol, sensible à l'effet des pratiques culturales, jouant un rôle déterminant au niveau de la minéralisation de l'azote organique du sol.

L'introduction de la canne à sucre dans les systèmes de culture bananiers s'accompagne d'une augmentation de la quantité de carbone restitué et d'un accroissement de la taille de la biomasse microbienne du sol. Les quantités d'azote restituées par la canne à sucre étant plus faibles que celles restituées par le bananier, l'augmentation de la taille de la biomasse microbienne ne s'accompagne pas d'une augmentation de la quantité d'azote minéralisable. Les modifications du statut organique du sol liées à la culture de la canne à sucre sont cependant de courte durée car le sol retrouve ses caractéristiques initiales lorsqu'il est de nouveau cultivé en banane.

BIBLIOGRAPHIE

- Amato M., Ladd J.N., 1988 - Essay for microbial biomass based on ninhydrin-reactive nitrogen in extracts of fumigated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 20, pp. 107-114.
- Angers D.A., N'Dayegamiye, Cote D. 1993 - Tillage induced differences in organic matter of particle-size fractions and microbial biomass. *Soil Science Society American Journal*. 57, pp. 512-516.
- Bonan H., Prime J.L., 2001 - Rapport sur la présence de pesticides dans les eaux de consommation humaine en Guadeloupe. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Ministère de l'emploi et de la solidarité, rapport n° 2001-070, 77 pages.
- Boudot J.P., Bel Hadj Brahim A., Chone T. 1988 - Dependence of carbon and nitrogen mineralization rates upon amorphous metallic constituents and allophanes in highlands soils. *Geoderma*, 42, 3-4, pp. 245-260.
- Cabidoche Y.-M., Dorel M., Paillat J.-M., Robin P., 2001 - Inventaire des données scientifiques et techniques disponibles dans les DOM INSULAIRES, relatives à la fertilisation azotée des cultures, à leur conduite, au fonctionnement des aquifères et aux phénomènes de transfert d'azote dans le milieu et à leur incidence. Expertise demandée par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Direction de l'Eau, APC INRA Antilles-Guyane, 68 pages.
- Carter M.R. 1991. The influence of tillage on the proportion of organic carbon and nitrogen in the microbial biomass of medium-textured soils in a humid climate. *Biol. Fertil. Soils*, 11, pp.135-139.
- Chadwick O.A., Gavenda R.T., Kelly E.F., Ziegler K., Olson C., Elliott W.C., Hendricks D.M., 2003 - The impact of climate on the biogeochemical functioning of volcanic soils. *Chemical Geology*, 202, pp. 195-223.
- Chaperon P., L'hôte Y., Vuillaume G., 1985 - Les ressources en eau de surface de la Guadeloupe. Monographies hydrologiques de l'Orstom, n°7. 834 p.
- Chaussod R., Zuvira M., Breuil M.C., Hétier J.M., 1992 - Biomasse microbienne et statut organique des sols tropicaux : exemple d'un sol vénézuélien des Llanos sous différents systèmes de culture. *Cahier de l'Orstom, série Pédologie*, 27, 1, pp. 59-67
- Chaussod R., Houot S., 1993 - La biomasse microbienne des sols : perspectives d'utilisation de cette mesure pour l'estimation de la fourniture d'azote par les sols. *In: Matières organiques et agriculture ; J.Decroux et J.C. Ignazi, Eds*, pp. 17-26.
- Chaussod R. 1996 - La qualité biologique du sol. Evaluations et implications. *Etude et Gestion des Sols*, 3, 4. pp. 261-277.
- Clermont-Dauphin C., Cabidoche Y.M., Meynard J.M., 2004 - Effects of intensive monocropping of bananas on properties of volcanic soils of uplands of the French West Indies. *Soil Use and Management*, 20, pp. 1-9.
- Colmet-Daage F. et Lagache P. 1965 - Caractéristiques de quelques sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cahier de l'ORSTOM, Série Pédologie*, 3, 2, pp. 91-121.
- Colmet-Daage F. 1969 - Carte des sols des Antilles. ORSTOM.
- Dahlgren R.A., Saigusa M., Ugolini F.C., 2004 - The Nature, Properties and Management of Volcanic Soils. *In Advances in Agronomy*. Sparks Ed., pp. 113-182.
- Dorel M., 1993 - Travail du sol en bananeraie : cas des Andosols. *Fruits*, 48, 2, pp. 77-82.
- Dorel M., 2001 - Effet des pratiques culturales sur les propriétés physiques des sols volcaniques de Guadeloupe et influence sur l'enracinement du bananier. Thèse Université Catholique de Louvain, 129 pages.
- Feller C., 1994 - La matière organique dans les sols tropicaux à argile 1 : 1 : Recherche de compartiments organiques fonctionnels. Une approche granulométrique. Thèse ULP Strasbourg. ORSTOM Editions, Série TDM, 393 pages.
- Feller C. and Beare M.H., 1997 - Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma* 79, pp. 69-116.
- Khamsouk B., 2001 - Impact de la culture bananière sur l'environnement. Influence des systèmes de culture bananières sur l'érosion, le bilan hydrique et les pertes en nutriments sur un sol volcanique en Martinique. Thèse ENSA Montpellier, 214 pages.
- Mikuta R., Kleber M., Jahn R., 2005 - Poorly crystalline minerals protect organic carbon in clay fractions from acid subsoil horizons. *Geoderma*, 128, pp. 106-115.
- Mizota C., van Reeuwijk L.P., 1989 - Clay mineralogy and chemistry of soils formed in volcanic material in diverse climatic regions. *Soil Monograph*, volume 2, ISRIC, Wageningen, 185 pages.
- Parfitt R.L., Russel M., Orbell G.E., 1983 - Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophone and halloysite, New Zealand. *Geoderma* 29, pp. 41-57.
- Pouzet D., Velle A., Rassaby A., 2002 - Estimation des résidus de récolte de la canne à sucre. Bilan des études menées au cours des campagnes sucrières 2000 et 2001 sur l'île de la Réunion. Doc. Interne Cirad-CA, 14 pages.
- Powers J.S., Schlesinger W.H., 2002 - Relationships among soil carbon distributions and biophysical factors at nested spatial scales in rain forests of northern Costa Rica. *Geoderma*, 109, pp. 165-190.
- Quantin P. 1972 - Les Andosols. Revue bibliographique des connaissances actuelles. *Cahier de l'Orstom. Série Pédologie*, 10, 3, pp. 273-301.
- Richards L.A., 1941 - A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Science*, 51, pp. 377-386.
- Robert M., 2002 - La séquestration du carbone dans le sol pour une meilleure gestion des terres. Rapport sur les ressources en sol du monde, n°96. FAO 76 pages.
- Saggar S., Tate K.R., Feltham C.W., Childs C.W., Parshotam A., 1994 - Carbon

- turnover in a range of allophanic soils amended with labelled glucose. *Soil Biology and Biochemistry*, 26, 9, pp. 1263-1271.
- Shoji S., Nanzyo M., Dahlgren R.A., 1993 - Volcanic Ash Soils, Genesis, Properties and Utilization. *Development in soils science* 21. 288 pages.
- Shoji S., Nanzyo M., Dahlgren R.A., Quantin P., 1996 - Evaluation and proposed revisions of criteria for andosols in the World Reference Base for soil resources. *Soil Science*, 161, 9, pp. 604-615.
- Sollins P., Homan P. Caldwell B.A., 1996 - Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma* 74, pp. 65-104.
- Sparling G.P., 1997 - Soil microbial biomass, activity and nutrient cycling as indicators of soil health. *In* *Biological Indicators of Soil Health*, Ed. Pankhurst C.E, Doube B.M., Gupta V.V.S.R., pp. 97-119.
- Waring S.A, Bremner J.M., 1964 - Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature*, 201, pp. 951-952.

Porosity and soil water properties of Caribbean volcanic ash soils

M. Dorel^{1*}, J. Roger-Estrade², H. Manichon¹ & B. Delvaux³

Abstract. Volcanic ash soils are generally recognized as soils with excellent and stable physical properties. Here we characterized the porosity and water properties of volcanic ash Andosols and Nitisols from Guadeloupe in contrasting banana systems: (1) perennial crop without mechanization, (2) mechanized and regularly replanted crop. Desiccation from 1 kPa to 1550 kPa moisture tension leads to significant shrinkage in the Andosol, representing a 50% reduction of the void space. The clayey Nitisol exhibited limited shrinkage. Soil clods from the mechanized plots had a significantly smaller macroporosity than that from perennial plots. The soil hydraulic conductivity was also drastically reduced in the compacted layers of the mechanized plots. However, Nitisols appeared to be less affected than Andosols. Laboratory compression tests showed that both soils were susceptible to compaction at soil moisture close to field capacity. The shrinkage properties of the Andosol were due to micro-aggregation of non-crystalline components upon drying. The relative stability of the macroporosity in the Nitisol was probably related to the presence of stable microaggregates made of halloysite and iron oxide. Two major processes promote soil structure degradation in the Andosol under mechanized banana cropping, surface desiccation and soil compaction. They are both induced by repeated tillage after clearing.

Keywords: Andosols, Nitisols, volcanic ash soils, soil water retention, hydraulic conductivity, porosity, bananas, soil management

INTRODUCTION

In the island Basse-Terre (Guadeloupe, 16°N 61°W, Caribbean area), Andosols and Nitisols are members of climotoposequences derived from volcanic ash, on the lower eastern slopes of the volcano La Soufrière, which are exposed to the Atlantic rain bearing winds (Colmet-Daage & Lagache 1965). Such sequences are associated with the mineralogical sequence pyroclast→allophane→halloysite (Ndayiragije 1996), as commonly observed in other volcanic environments. These soils are used intensively for banana growing. Their cultivation tends to degrade soil structure, probably through compaction and reduction of soil organic matter. Production of bananas can vary greatly with soil porosity and water properties, because a critical soil moisture balance must be kept to satisfy the plant requirements (Delvaux 1995). Indeed, banana roots do not develop in poorly aerated conditions and they only extract water at low suction (suction values above 30 kPa induce water stress: Robinson & Bower 1987). Soil components such as allophane and halloysite are expected to affect the porosity and water properties of the

Andosols and the Nitisols, respectively. In allophanic Andosols, drying results in an irreversible decrease in porosity and moisture retention (Maeda & Warkentin 1975; Maeda *et al.* 1977; Perret 1993; Nanzyo *et al.* 1993). Microaggregation of allophanic clays greatly contributes to such irreversible change (Nanzyo *et al.*, 1993). Though these authors reported that cultivation of Andosols tends to degrade soil structure through compaction, this has been poorly documented, probably because Andosols are considered to have a low susceptibility to compaction (Maeda *et al.* 1977). This could be attributed to a high shear strength (Mc Nabb & Boersma, 1993). Halloysite-rich soils are widespread in volcanic environments worldwide (Quantin 1990). However, their porosity and water properties are little known.

We characterized the soil porosity and water properties in an Andosol→Nitisol sequence from Guadeloupe in two contrasting banana growing systems: (i) perennial crop without mechanization (p), (ii) mechanized crop with frequent replanting (m). In particular, we investigated the combined effects of drying and mechanical constraint through compression tests applied at different water potentials on undisturbed soil samples. We report the results in this paper.

MATERIALS AND METHODS

Soils

We selected four pedons (BR_m, NF_m, ML_m and CH_m) under mechanized (m) and regularly replanted bananas. They derived from pyroclastic materials of Quaternary age and andesitic-dacitic composition. They are members of a sequence, which is located on the southern part of the eastern

¹CIRAD-FLHOR, Station de Neufchâteau, 97130 Capesterre-Belle-Eau French West Indies. Fax: 05 90 86 80 77

E-mail: dorel@cirad.fr

²Department of Agronomy and Environment INA-PG, 78850 Thiverval-Grignon, France. Fax: 01 30 81 54 25.

E-mail: jroger@jouy.inra.fr

³Université Catholique de Louvain. Place Croix du Sud 2-10. 1348 Louvain La Neuve, Belgium.

E-mail: delvaux@pedo.ucl.ac.be

*Correspondence and reprints: CIRAD-FLHOR, BP 5035, 34032 Montpellier, France.

Table 1. Characteristics of the major A and B horizons of the soil sequence (Adapted from Ndayiragije, 1996).

Soil classification	Profile Abbrev.	Altitude (m)	Annual rainfall (mm)	Horizon Depth (cm)	Bulk Density (t m^{-3})	Specific Gravity (t m^{-3})	Clay (% <2 μm)	Silt (% 2–50 μm)	Sand (% >50 μm)	Carbon Content (g kg^{-1})	Allophane Content (g kg^{-1})	Fe^{c} (g kg^{-1})	Fe^{d} (g kg^{-1})	Phosphate retention (%)	Dominant secondary minerals
Andosol perhydrate ^a Mollic Androsol ^a	BR	420	4000	A (0–20) B(20–60)	0.53 0.41	2.38 2.61	54 65	28 26	19 9	106 39	30 250	55.6 43.9	26.6 15.9	96 99	Allophane and gibbsite
Andosol ^a Mollic Andosol ^b	NF	250	3500	A(0–30) B(30–60)	0.80 0.70	2.41 2.61	62 67	32 24	6 9	56 25	90 260	– –	– –	– –	Allophane and gibbsite
Sol brun andique ^a Mollic Andosol ^b	ML	80	2700	A(0–20) B(20–60)	0.99 0.73	2.61 2.68	62 68	27 24	11 8	33 12	80 170	50.7 59.2	16.1 19.1	92 97	Hydrated halloysite and allophane
Sol brunrouille a halloysite ^a Haplic Nitisol ^b	CH	30	2500	A(0–50) B(50–80)	1.15 0.96	2.75 2.75	80 80	14 16	6 4	18 6	<1 <1	71.4 69.0	6.8 3.4	57 65	Halloysite

^a Regional soil classification (Colmet-Daage & Lagache, 1965). ^b FAO classification. ^c Dithionite Citrate Bicarbonate extractable iron. ^d Oxalate extractable iron.

Table 2. Experimental design.

Plots	Soil type	Cropping system
NFp	Andosol	Perennial banana plantation installed after deforestation (1960)
CHp	Nitisol	
NFm	Andosol	Mechanized banana plantation (replanted about every 3 years)
CHm	Nitisol	

p: perennial, m: mechanized.

coast of Guadeloupe in the district of Capesterre, on the lower eastern slopes of the volcano La Soufrière. The sequence is characterized by a steady transition, as altitude and rainfall decrease, from allophanic Andosol to halloysite-rich Nitisol (Colmet-Daage & Lagache 1965). Table 1 summarizes the major properties of selected A and B soil horizons of the four pedons. Andic properties such as low bulk density (0.9 t m^{-3}) and high phosphate retention ($>70\%$) are well expressed in the Ap and Bw horizons of pedons BR_m and NF_m, and in the Bw horizon of ML. The loss of andic character runs parallel to the decrease in altitude and rainfall. C content decreases whereas free iron and clay content, as well as bulk density, all increase in the pedon CH_m. In this soil, halloysite dominates the weathering complex.

We selected two additional pedons (NF_p and CH_p) under perennial (p) bananas without mechanization for a comparative study with the corresponding Andosol NF_m and Nitisol CH_m (Table 2). Management practices were carried out by hand in the p system. The m system involved three operations prior to replanting: (1) repeated heavy disc harrowing for destruction and burial of existing vegetation, (2) subsoiling at about 40 cm depth, (3) ditching to create 40 cm deep planting furrows. The soil moisture contents measured in the Ap horizon before disc harrowing were 0.41 g g^{-1} and 0.82 g g^{-1} in CH_m and NF_m plots, respectively; they correspond to field capacity. The mean mechanical resistance of the Ap horizons before tillage was 115 N cm^{-2} in CH_m and 62 N cm^{-2} in NF_m, as measured using a cone-penetrometer (40 readings, cone base area 5 cm^2 , cone angle 60°).

Methods

The soil structure was described according to the Soil Survey Manual (1951) in the p system and to the procedure outlined by Manichon (1982) in the m system. One pit (2 m wide, 1 m deep) was described perpendicular to the planting row in each plot. Morphological units (MU) were delineated and characterized using the following nomenclature (Manichon, 1982):

- (1) Δ clods with massive and continuous appearance, smooth faces upon fragmentation and no visible porosity resulting from man-made compaction
- (2) Γ clods with rough ruptured faces upon fragmentation and visible pores; they result from the assemblage of fine aggregates caused by moisture content changes and/or moderate mechanical stress.

Eighty undisturbed clods of $3\text{--}4 \text{ cm}^3$ were collected from each selected horizon in the whole sequence BR_m–NF_m–ML_m–CH_m. For the p–m system comparison, we sampled undisturbed peds of $3\text{--}4 \text{ cm}^3$ in the Ap horizon: 80 clods in NF_p and CH_p, 80 Γ and 80 Δ clods in NF_m and CH_m. All the clods were stored at field capacity. Series of 10 clods were

equilibrated during 7 days at a given moisture tension (MT) at 20°C by using an ultra-filtration cell (Tessier & Berrier 1979) in the range 1 to 100 kPa and a pressure membrane (Richards 1941) in the range 300 to 1550 kPa. Then, the soil volume was measured by volumetric displacement in paraffin (Monnier *et al.* 1973). Void and water ratios, e and e_w , were then calculated using the following formulas:

$$e = V_v/V_s$$

$$e_w = V_w/V_s$$

where V_v , V_w et V_s are the void, water and solid volume respectively.

The solid volume was calculated using the values of specific gravity (Table 1), as measured with a water pycnometer. The relative void and water ratios (e_r , e_{wr}) were calculated as follows:

$$e_r = e_i/e_1 \times 100$$

where e_i and e_1 are the void ratios for MT = i and 1 kPa, respectively

$$e_{wr} = e_{wi}/e_{w1} \times 100$$

where e_{wi} and e_{ws} are the water ratios for MT = i and 1 kPa, respectively

The hydraulic conductivity was determined *in situ* in both p and m plots using a suction infiltrometer (Perroux & White 1988) between 0 and 1 kPa and calculated with the method of Reynolds & Elrick (1991). In m plots, three measurements were made at the surface of the Ap horizon and in the MU with Δ internal structure. In p plots, measurements were repeated in 9 positions randomly chosen at the surface of the Ap.

A compression test was carried out on Ap horizons in m plots. The samples were sieved at 5 mm, homogenized, placed in cylinders (3 cm diameter and height) and equilibrated at MT ranging from 1 to 1550 kPa. At each MT value, three samples were compressed during 1 minute using a piston with a pressure of 650 kPa (static uniaxial compaction with free drainage); three other samples were kept uncompressed. The mean value of the water and void ratios was calculated for each set of three samples.

Student's test ($\alpha = 5\%$) and multiple regression analysis were used to analyse the experimental data.

RESULTS

Void and water ratio in the whole sequence BR_m-NF_m-ML_m-CH_m

The void (e) and water (e_w) ratios are plotted against moisture tension (MT) in Figure 1 whereas their relative changes are shown in Figure 2. The reproducibility was good for all samples. Standard deviation decreased with increasing MT and fell to very low values above 100 kPa. At a given water potential, the materials exhibited significant differences in water and void ratios. Both e and e_w were higher in the Andosol BR_m than in the other soils and progressively decreased with the loss of andic properties. The lowest values of both indices were associated with the Nitisol CH_m devoid of andic material. In each horizon, desiccation induced a significant decrease in e and e_w . However, the andic materials (Ap, B of BR_m and NF_m, B of ML_m) displayed a stronger decrease of

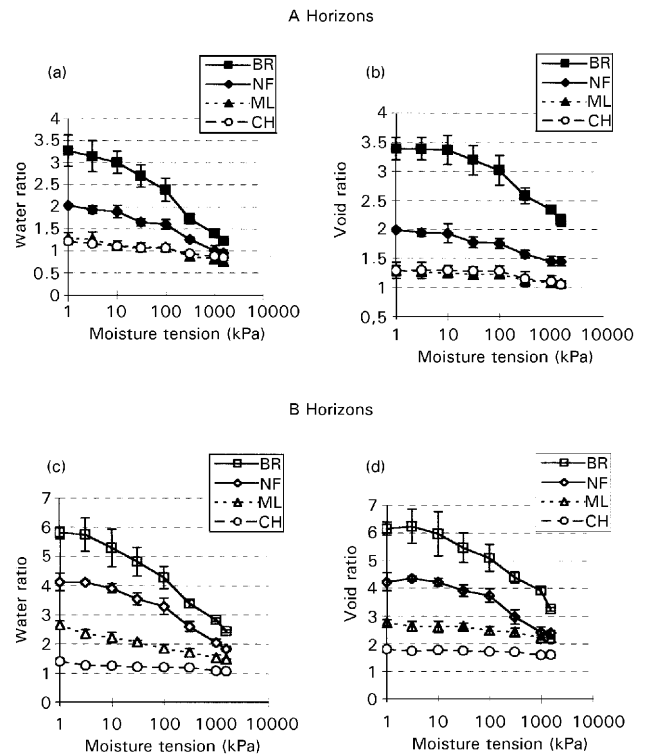


Figure 1. Changes in the water (a, c) and the void (b, d) ratios of the A and B horizons of the four soils studied as a function of the moisture tension. Bars represent standard deviation ($n = 10$).

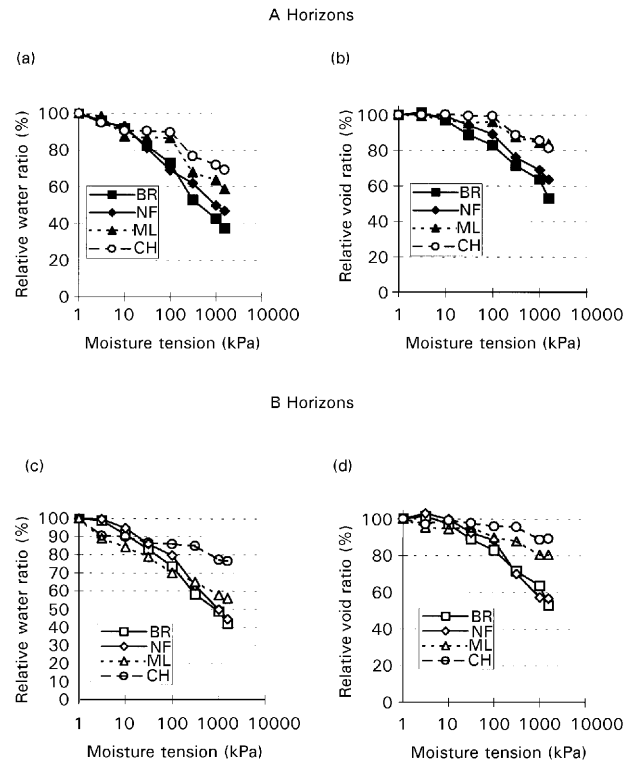


Figure 2. Changes in the relative water (a, c) and the relative void (b, d) ratios of the A and B horizons of the four soils studied as a function of the moisture tension.

Table 3. Soil structure in Andosol plot NF_p and in Nitisol plot CH_p (perennial crop).

Plots	NF _p	CH _p
A horizon	0–20 cm poorly developed fine sub-angular blocky structure many root channels	0–30 cm strong fine sub-angular blocky structure many root channels
Bw horizon	20–60 cm massive structure breaking into small sub-angular aggregates many fine pores	30–80 cm massive structure breaking into small sub-angular aggregates many fine pores

the relative water ratio (more than 50%), which was regular over the entire MT range, reflecting high porosity with evenly distributed pore size. Over 10 kPa, these materials also displayed significant shrinkage, which is typical of gel-like components with a structural organization closely depending on water content (Nanzyo *et al.* 1993). In non-andic materials (Ap of ML_m, Ap, B of CH_m), the relative water ratio decreased less than in andic materials. Particularly in the B of CH_m, less than 25% of water is lost from 1 to 1550 kPa and a plateau is observed between 10 and 100 kPa. These findings reflect irregular pore size distribution with few medium sized pores and many micropores. In fact, these halloysite-rich materials behave like sand for MT < 300 kPa and like clay above 1550 kPa. Indeed, the water stored in the largest pores was extracted without deformation of the void space, but with shrinkage in the smallest pores (equivalent radius < 1.5 μ m), as commonly observed in clayey soils (Stengel, 1979; Sala & Tessier, 1994). Such behaviour is due to the presence of two pore classes: structural porosity (rigid) and textural porosity, in which the capillary forces can induce re-arrangement of the pore space during drying.

Soil structure in perennial (p) and mechanized (m) systems

The structures described in the Ap of NF_p and CH_p are shown in Table 3 whereas those of NF_m and CH_m are illustrated in Figures 3a and 3b, respectively.

In the p system, both Ap horizons had a large biological porosity but the structure was better developed in the Nitisol CH_p than in the Andosol NF_p.

In the m system, only the top 10 cm of the Ap was strongly fragmented whereas large compact massive zones with Γ and Δ structures occurred in both soils, due to repeated disc harrowing (Dorel 1991, 1993). However, soil structure was also better developed in the Nitisol (CH_m). In the Andosol (NF_m), Δ clods were often associated with iron mottling. The subsoiler tines smeared the Andosol without causing significant fragmentation but generated cracks in the massive structures. Subsoiling was shallower in the Nitisol (30 cm) than in the Andosol (40 cm) probably because of a larger mechanical resistance in the former.

Porosity and water properties in perennial and mechanized systems

For any moisture tension, the void ratio (e) was significantly greater in NF_p than in NF_m (Figure 4a), reflecting an adverse effect of mechanization on pore space in the Andosol. The regular decrease of e_w with increasing MT indicates a uniform pore size distribution in NF_p. To the contrary in NF_m, large pores of radius ranging between 150 and 15 μ m (MT between 1 and 10 kPa) were absent in Δ clods and contributed to about 10% of the total porosity in Γ clods. Air entry occurred

from MT = 10 kPa in Γ clods and from 100 kPa in Δ clods, which were associated with iron mottling. The difference between e and e_w (Figure 4a) was significant over the whole MT range in NF_p whereas it was not over the MT range 1–10 kPa in Γ clods and 1–100 kPa in Δ clods in NF_m. The air-filled macropores at low tension disappeared in the mechanized Andosol, particularly in Δ clods. As inferred from the relative decrease of e_w in NF_p and NF_m, mechanical stress in the m system affected both macropores and medium pores of radius ranging between 1.5 and 150 μ m (MT = 1 to 100 kPa). Above 100 kPa, e_w was similar in NF_p and NF_m, whatever the type of clods, suggesting that mechanization did not affect the fine pores of radius < 1.5 μ m.

Mechanization also affected the Nitisol CH (Figure 4b). For each MT, e was significantly higher in CH_p than in CH_m. As inferred from the decrease of e_w with increasing MT, CH_p had a more uniform pore size distribution than CH_m. The water ratio was larger in CH_m than in CH_p for MT > 100 kPa probably because tillage incorporated into the Ap horizon some fragments of the B horizon, which has a finer porosity (see Figures 1 and 2). The difference between e and e_w at low MT indicated that air-filled macropores with radius > 150 μ m (MT = 1 kPa) occurred in both CH_p and CH_m, whatever the type of clod. However, these pores were more abundant in CH_p. Between 1 and 300 kPa, the decrease of e_w was larger in Γ than in Δ clods of CH_m, indicating that macropores of radius > 1 μ m were more abundant in the former. Above 300 kPa, both types of clods had similar e_w values, and hence similar volumes of fine pores of radius < 1 mm.

In the Andosols, the mean hydraulic conductivity at water saturation (K_s) was 350 mm h⁻¹ in NF_p as well as in the fragmented upper part of NF_m, (Figure 5a). These values indicated free drainage. In the compacted horizon with Δ structure in NF_m (Figure 3a), mean K_s was much less, at 35 mm h⁻¹ (Figure 5a). In the Nitisols, soil tillage generated abundant macropores (Figure 3b) and greatly increased the mean K_s to 900 mm h⁻¹ in the fragmented upper part of CH_m compared with 300 mm h⁻¹ in CH_p (Figure 5b). The mean K_s was 150 mm h⁻¹ in the compacted horizon with Δ structure of CH_m. These values indicated free drainage in both mechanized (m) and non-mechanized (p) Nitisols. The relatively high value of K_s in the Δ structured horizon of CH_m shows that Δ clods in the Nitisol contained residual and functional macroporosity, as also inferred from their porosity and water retention properties. Unlike the Andosol, the Nitisol in the m system did not exhibit iron mottling associated with impeded drainage (Figure 3).

The compression curves are illustrated in Figure 6. Standard error was below 0.02 for all points of the curves. The gen-

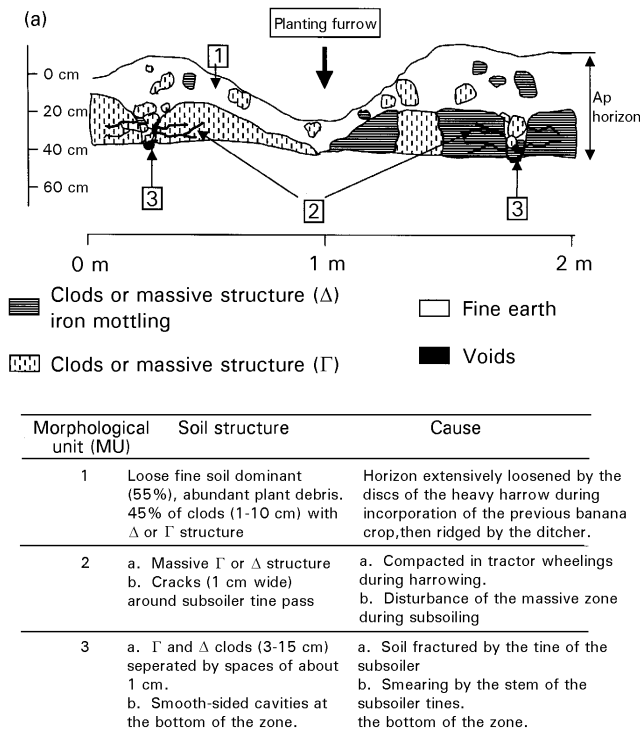


Figure 3a. Structural variation of the Ap horizon in Andosol NFm plot.

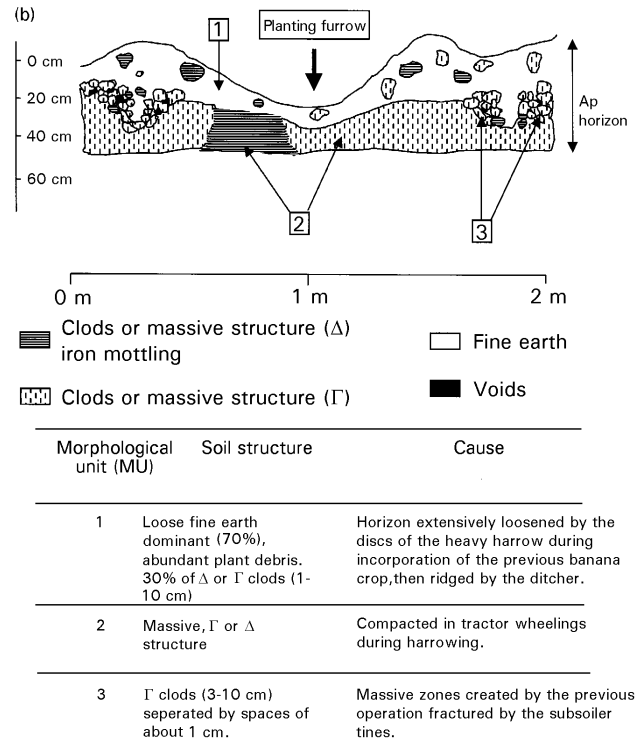


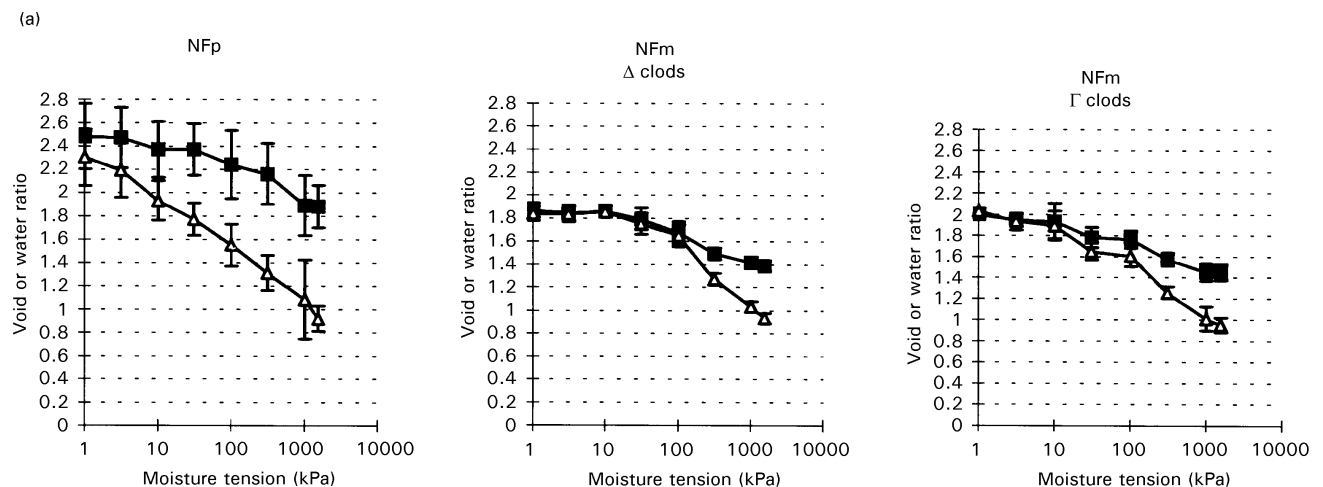
Figure 3b. Structural variation of the Ap horizon in Nitisol CHm plot.

eral shape of the curve for CH_m was typical for a clayey material (Guérif 1990) because the void ratio in the Nitisol was minimum when compression was applied at low MT. In the Andosol NF_m, the void ratio was only slightly affected by soil moisture tension, suggesting very little effect of water content on the susceptibility to compaction. However, at high moisture tension, drying drastically reduced the pore volume, because of microaggregation of non-crystalline clays (Nanzio *et al.* 1993). Thus, the slight change in void ratio probably resulted from the combined effects of drying and mechanical stresses in NF_m. The difference between the void ratio of non-compacted and that of compacted samples (Δe) was calculated to assess the effect of mechanical stress alone

on pore space (Figure 7) in both NF_m and CH_m. In both, Δe increased with decreasing MT and reached a maximum value below 10 kPa. This implies a larger sensitivity to compaction at low water tension in both soils.

DISCUSSION AND CONCLUSION

Porosity and water properties in the sequence BR_m-NF_m-ML_m-CH_m
The decrease of total porosity and water retention from BR_m to CH_m corroborates previous observations reporting a parallel decrease in porosity, andic character and altitude in similar soil sequences (Warkentin *et al.* 1988; Perret 1993). Soil water properties have often been used to distinguish Ando-

Figure 4a. Changes in the water (Δ) and void (\blacksquare) ratios with moisture tension in the Andosol NFp and NFm plots (Γ clods and Δ clods). Bars represent standard deviation ($n=10$).

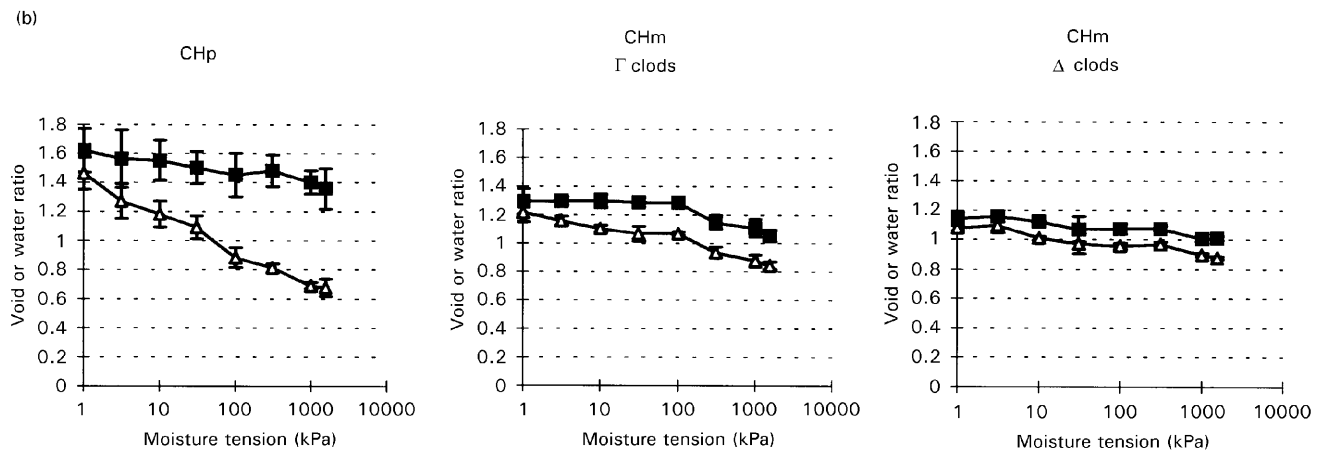


Figure 4b. Changes in the water (Δ) and void (\blacksquare) ratios with moisture tension in the Nitisol CHp and CHm plots (Γ clods and Δ clods). Bars represent standard deviation ($n = 10$).

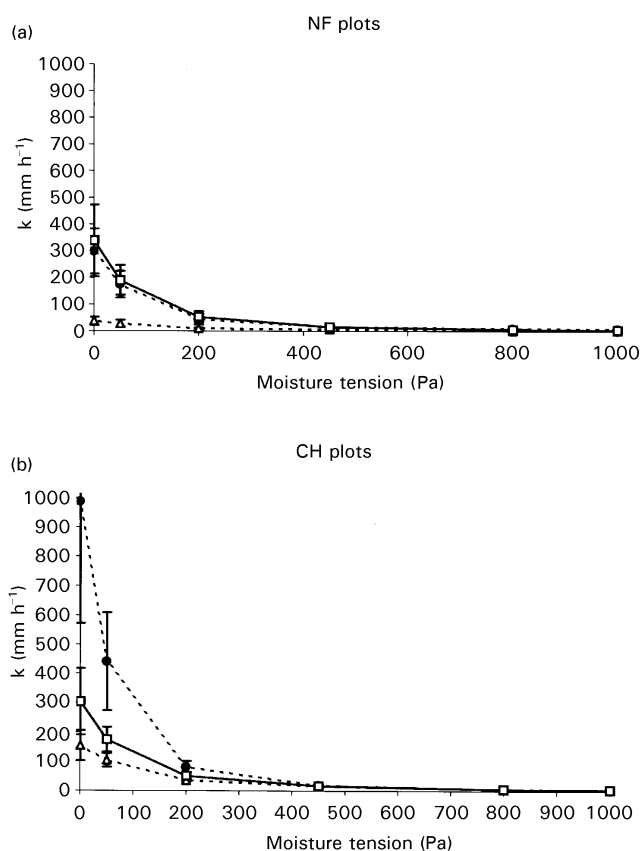


Figure 5. Hydraulic conductivity of A horizons as a function of moisture tension in the Andosol NF (a) and Nitisol CH (b) plots, \square : perennial plots. Bars represent standard deviation ($n = 9$) \bullet : mechanized plots, surface of the A horizon. Bars represent standard deviation ($n = 3$) Δ : mechanized plots, massive Δ structure. Bars represent standard deviation ($n = 3$).

sols from other soil types because allophanic clays have a large affinity for water (Colmet-Daage & Gautheyrou 1974). In our study, water ratio was significantly and linearly correlated with allophane content for $\text{MT} > 300 \text{ kPa}$ ($r = 0.85$, $P < 1\%$). At lower MT values, a linear model involving both allophane and carbon contents gave the best fit ($r = 0.90$, $P < 2\%$), suggesting a key role of organic matter in the formation of

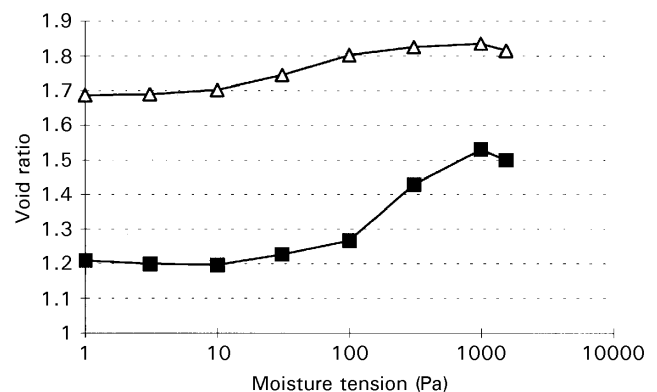


Figure 6. Void ratio after compaction as a function of the moisture tension at the moment of compaction in the Andosol NFm plot (Δ) and in the Nitisol CHm plot (\blacksquare).

macropores. Ito *et al.* (1991) observed a similar relationship, but ferrihydrite content was also involved.

It is noteworthy that the shrinkage measured in the andic materials (Ap, B of BR_m and NF_m , B of ML_m) was greater than that reported over the same MT range for Vertisols rich in swelling clays (Yule & Ritchie 1980). However, most of the volume change is irreversible. This distinguishes allophane soils from swelling mineral soils, where the volume changes are more nearly reversible (Maeda *et al.* 1977). In the field, the marked shrinkage of Andosols does not lead to the formation of cracks, as observed in Vertisols (Wilding & Tessier 1988) probably because drying of andic material involves irreversible dehydration and microaggregation, which develops fine fragmentary structure *in situ* (Perret 1993). This process induces severe reduction in water storage (Nanzio *et al.* 1993). Less porosity and water retention in the Ap than in the Bw horizon of the Andosols (BR_m , NF_m , ML_m) is attributed to less allophane in the Ap horizons as well as to repeated surface desiccation caused by tillage operations during the short dry season.

The presence of two major pore classes related to structural (rigid) and textural porosity in the Nitisol is typical of pseudo-sand and is very similar to the bimodal pore distribution in Ferralsols, caused by the stable microaggregates made of 1:1 phyllo-

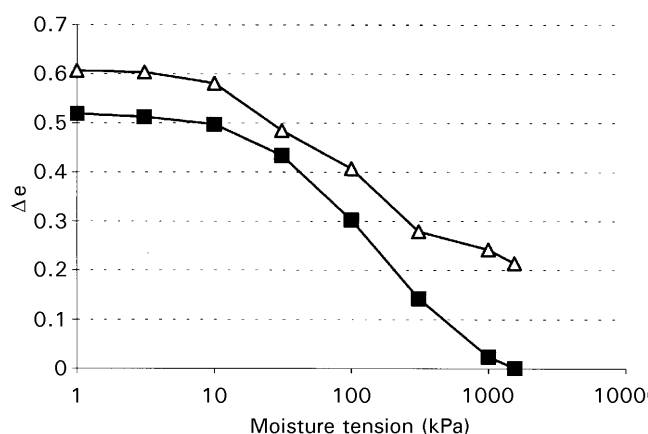


Figure 7. Difference between the void ratio of non-compacted and laboratory compacted samples (Δe) as related to their moisture tension at the moment of compaction in the Andosol NFM plot (Δ) and in the Nitisol CHM plot (\blacksquare).

silicate and iron oxide (Uehara & Gillman 1981). In the Nitisol, a fair content of free iron oxides (Table 1) and their reactivity (Ndayiragije 1996) probably favours the formation of stable microaggregates made of ferrihydrite and halloysite. The stability of these microaggregates is probably enhanced by the high surface area of ferrihydrite and the charge properties of halloysite, which is in fact a halloysite-smectite mixed-layer clay (Delvaux *et al.* 1991) with strong effects on the microstructure of clay particles (Delvaux *et al.* 1992).

Structure, porosity and water properties in perennial and mechanized systems

In the p system, changes in soil structure depend on wetting-drying cycles and on biological activity in the soil. Thus, the undisturbed clods exhibit substantial macroporosity, which is much higher than in the clods sampled in the m system. The soil structure degradation is, however, less pronounced in the Nitisol than in the Andosol. Most compacted structures of Δ type in the Nitisol retain macroporosity which ensures water and air movement. As discussed above, such persistency is probably due to stable microaggregation of halloysite-smectite and ferrihydrite, which can also explain the high hydraulic conductivity in this soil. Stronger structure degradation in the Andosol under mechanized cropping induces poor aeration and drainage leading to hydromorphic processes involving iron reduction.

Soil structure degradation is caused by mechanical stress in both soils, and, to a lesser extent, by surface desiccation in the Andosol. Land preparation prior to banana re-planting is the major cause of soil structure degradation in both soils. In particular, repeated disc harrowing is destructive (Dorel 1991 1993). This type of cultivation has a large detrimental effect in Andosols because once mechanically stressed, the soil abruptly changes from solid to liquid state. This thixotropic behaviour causes the soil to adhere strongly to tillage implements, resulting in poor fragmentation (Perret & Dorel 1999).

Our observations on strong structural degradation in Andosols refute the usual consensus about the stable structure and the low susceptibility to compaction of these soils.

Our results show that the small effect of the initial water content on the porosity of compressed soil cannot be interpreted as a lack of sensitivity of the wet Andosol to compaction. At high MT, the andic material indeed experienced both mechanical and water stress. The latter resulted in a significant reduction of pore space. Both Andosol and Nitisol are susceptible to compaction at high water contents, corresponding to $MT < 10$ kPa. Our results confirm those reported by Sala & Tessier (1994), showing a maximum compaction of clayey soils for MT values near 10 kPa. The porosity of the Andosol and Nitisol, and hence their water storage and hydraulic conductivity are likely to be reduced if land preparation occurs at field capacity.

In spite of shrinkage on drying, the ability of Andosols to recover from compaction is low in the climatic conditions of Guadeloupe. The absence of a dry season causes the soil moisture to remain close to field capacity. Consequently, soil volume changes are small especially in the deeper part of tilled layers.

Volcanic ash soils show a high resistance to aggregate dispersion because aggregates are strongly cemented by non-crystalline materials and soil organic matter (Nanzio *et al.* 1993). Crust formation due to aggregate dispersion by raindrops is rarely observed. Compaction and desiccation appear to be the main processes affecting the structure of these soils under mechanized banana growing.

REFERENCES

- Colmet-Daage F & Lagache P 1965. Caractéristiques de quelques groupes de sols dérivés de roches volcaniques aux Antilles françaises. *Cahiers de l'ORSTOM série pédologie* 8, 91–121.
- Colmet-Daage F & Gautheyrou J 1974. Soil associations on volcanic material in tropical America with special reference to Martinique and Guadeloupe. *Tropical Agriculture (Trinidad)* 51, (2), 121–128.
- Delvaux B, Dorel M & Vielvoye L 1991. Comportement d'échange du potassium dans les sols de la bananeraie guadeloupéenne. Application à la programmation de la fumure potassique. *Fruits* 46, 3–11.
- Delvaux B, Tessier D, Herbillon AJ, Burtin G, Jaunet AM & Vielvoye L 1992. Morphology, texture and microstructure of halloysitic clay soils as related to weathering and exchangeable cation. *Clays and Clay Minerals* 40, 446–456.
- Delvaux B 1995. Soils. In: *Bananas and Plantains*. (ed. S. Gowen), Chapman & Hall, pp. 230–255.
- Dorel M 1991. Problèmes de préparations du sol en bananeraie: cas des sols à halloysite. *Fruits* 46, 419–427.
- Dorel M 1993. Travail du sol en bananeraie: cas des Andosols. *Fruits* 48, 77–82.
- Guerif J 1990. Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques. In: *La structure des sols et son évolution* (eds J. Boiffin & A. Marin-Laflèche), actes du Colloque, INRA, Laon, 71–90.
- Macnabb DH & Boersma L 1993. Evaluation of Relationship between Compressibility and Shear Strength of Andisols. *Soil Science Society America Journal* 57, 923–929.
- Maeda T & Warkentin BP 1975. Void changes in allophane soils determining water retention and transmission. *Soil Science Society America Proceedings* 39, 398–403.
- Maeda T & Takenada H & Warkentin BP 1977. Physical properties of allophane soils. *Advances in Agronomy* 29, 229–261.
- Manichon H 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural. Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. INA-PG Thesis, Paris.
- Monnier G, Stengel P & Fies JC 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Annales Agronomiques* 24, 533–545.
- Nanzio M, Shoji S & Dahlgreen R 1993. Physical Characteristics of volcanic ash soils. In: *Volcanic ash soils. Genesis, Properties and utilization*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 189–207.

- Ndayiragije S 1996. Caractérisation d'une séquence d'altération de sols dérivés de matériaux pyroclastiques sous climat tropical humide des Antilles (Guadeloupe). Thesis, Université Catholique de Louvain.
- Perret S 1993. Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Thesis, ENSA Montpellier.
- Perret S & Dorel M 1999. Relationships between land use, fertility and Andisol behaviour: examples from volcanic islands. *Soil Use and Management* 15, 144–149.
- Perroux KM & White I 1988. Design for discs permeameters. *Soil Science Society of America Journal* 52, 1205–1215.
- Quantin P 1990. Specificity of the halloysite-rich tropical or subtropical soils. In: 14th International Congress of Soil Science, 12–18 August 1990, Kyoto, Japan. *AISS*, 7, 16–21.
- Reynolds WD & Elrick DE 1991. Determination of hydraulic conductivity using tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal* 55, 633–639/ref.txt
- Richards LA 1941. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Science* 51, 377–386.
- Robinson JC & Bower JP 1987. Transpiration characteristics of banana leaves in response to progressive depletion of available soil moisture. *Scientia Horticulturae* 30, 289–306.
- Sala GH & Tessier D 1994. Rétention de l'eau par les matériaux argileux: Signification et prévision. *Compte-rendus de l'Académie des Sciences, Série II* 318, 381–388.
- Soil Survey Staff 1951. *Soil Survey Manual*, USDA, Washington D.C.
- Stengel P 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique. *Annales Agronomiques* 30, 27–51.
- Tessier D & Berrier J 1979. Utilisation de la microscopie à balayage dans l'étude des sols. Observations de sols soumis à différents pF. *Science du Sol* 1, 67–82.
- Uehara G & Gillman G 1981. The mineralogy, chemistry, and physics of tropical soils with variable charge clays. In: *Westview Tropical Agriculture Series*, n° 4, Boulder, Colorado.
- Warkentin BP Maeda T & Soma K 1988. Physical characteristics for classification of Andisols. In: *Proceedings of the 9th International Soil Classification Workshop*, Japan, 97–107.
- Wilding LP & Tessier D 1988. Genesis of vertisol: Shrink-swell phenomena. In: *Vertisols, their distribution, properties, classification and management* (eds L.P. Wilding & R. Puentes). Technical Monograph N°18. Soil Management Support Services USDA, 55–81.
- Yule DR & Ritchie JT 1980. Soil Shrinkage relationships of Texas Vertisols: I. Small Cores. *Soil Science Society of America Journal* 44, 1285–1291.

Received May 1999, accepted after revision November 1999.